¿QUÉ SABEMOS DE?

SEGUNDA EDICIÓN

El lado oscuro del universo

Alberto Casas

CSIC





El lado oscuro del universo

Alberto Casas





Colección ¿Qué sabemos de?

Catálogo general de publicaciones oficiales

http://www.publicaciones.060.es







Diseño gráfico de cubierta: Carlos Del Giudice

Ilustración de cubierta: © NASA, ESO, ESA

and STAGES and COMBO-17 Collaborations

Fuencarral, 70

28004 Madrid

Tel. 91 532 05 04

www.catarata.org

isbn (csic): 978-84-00-09214-6

isbn (catarata): 978-84-8319-549-9

e-isbn: 978-84-9097-540-4

nipo: 472-10-211-5

depósito legal: M-45.753-2010





A Resu, Alberto y Laura,
el lado luminoso de mi vida.

Agradecimientos

Tengo una enorme deuda con Luis Álvarez-Gaumé, por su generoso apoyo y acertadas sugerencias en el anterior libro (*El LHC y la frontera de la física*) y el estímulo que generó para éste. También quiero agradecer las aportaciones de Raúl Jiménez y Carlos Muñoz y el impulso recibido de Beatriz Hernández (CSIC) y Pía Paraja (editorial Los Libros de la Catarata). La redacción del libro se ha beneficiado de muchas sugerencias y correcciones aportadas por mi mujer, Resu del Pozo, después de una lectura crítica de la primera versión. Sin su apoyo y el de nuestros dos hijos, Alberto y Laura, este libro no se hubiera escrito, y a ellos está dedicado.

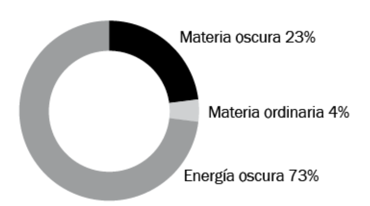
Introducción

Casi todo lo que hay en el universo es invisible. No sólo invisible para nuestros ojos, sino también para los más sofisticados telescopios y otros instrumentos de observación. La materia ordinaria, que forma los planetas, las estrellas y el gas y el polvo cósmicos, sólo representa el 4% del contenido del universo. El resto lo constituyen las llamadas *materia oscura* y *energía oscura*, dos de los descubrimientos más espectaculares e inesperados de los últimos tiempos.

Hasta el momento, estas extrañas sustancias han revelado su existencia de forma indirecta, a través de sus efectos gravitatorios sobre la materia ordinaria y la luz, y por las huellas que han dejado en la evolución del universo. En realidad, sabemos muy poco acerca de su naturaleza. La materia oscura supone el 23% del contenido del universo y se encuentra dentro y alrededor de las galaxias, envolviéndolas como un halo difuso. Prácticamente, lo único que conocemos de ella es que ha de ser distinta de la materia ordinaria. Esto significa que para entenderla hay que ir más allá de las teorías actuales para describir la materia. Por ello, su comprensión supone un reto fascinante para la física de partícu-

las. Muy posiblemente, la materia oscura esté constituida por algún tipo de partículas desconocidas, que viajan por el universo y atraviesan la materia ordinaria sin interaccionar apenas con ella. Esto implica, por ejemplo, que usted estaría siendo atravesado/a a cada segundo por miles de esas misteriosas partículas. La energía oscura es aún más rara, aunque las pruebas de su existencia son menos contundentes. Se trata de una especie de "energía del vacío", como si el propio espacio vacío poseyera masa. La energía oscura representa un 73% del total de la materia y energía del universo. La razón de su existencia es un gran misterio y plantea un reto aún más formidable para la física actual.

En vista de lo anterior podemos representar los ingredientes del universo en el siguiente gráfico:



Estos hallazgos representan, en cierto sentido, una nueva revolución copernicana, que está teniendo lugar ahora mismo. Una vez más descubrimos que nuestra posición en el universo no es única ni privilegiada. En el siglo XVI, Copérnico dio un gran salto conceptual al mostrar que la Tierra era un planeta más, no el centro del universo. En contrapo-

sición al antiguo universo *geocéntrico*, en el nuevo universo *heliocéntrico* el lugar central pasó de la Tierra al Sol. La historia de la ciencia ha proporcionado varias revoluciones copernicanas en ámbitos diversos. Por ejemplo, la teoría de Darwin permitió entender que el ser humano es un producto de la evolución, no una especie esencialmente distinta al resto de seres vivos. En cuanto a nuestro lugar en el universo, la revolución de Copérnico tampoco ha sido la única. Posteriormente a ella, se fue haciendo evidente que el Sol era una estrella más entre millones[1], diluyendo la importancia de nuestro sistema solar. A comienzos del siglo XX la creencia general era que todas las estrellas pertenecían a una única *galaxia* (nuestra Vía Láctea), ocupando el Sol y sus planetas un lugar céntrico en la misma. Sin embargo, hacia 1920 Shapley probó que nos encontramos más bien en la periferia de la Vía Láctea, en uno de sus brazos espirales más externos. Al poco tiempo, Hubble demostró que nuestra galaxia no es única, sino que había otras muchas (actualmente se conoce la existencia de miles de millones). En cada uno de estos saltos conceptuales, nuestra posición se ha ido haciendo más y más insignificante. Ahora nos toca descubrir que la materia de la que está hecho todo lo que somos capaces de percibir, incluidos nosotros mismos, no es el único ni el más importante ingrediente del universo.

Fundamentalmente, la materia y la energía oscuras son un misterio por resolver. Sin duda, para entenderlas será necesario que nuestra noción actual del mundo se abra a nue-

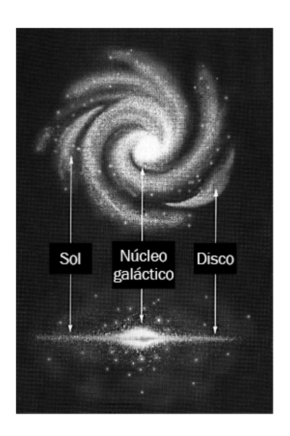
vos hechos e ideas, posiblemente revisando concepciones que ahora parecen firmemente establecidas. Por todo ello, este *lado oscuro del universo* recién atisbado es un área de investigación excitante de la física actual, que puede abrirnos ventanas a nuevas leyes y hechos básicos de la naturaleza.

A lo largo de este libro, analizaremos las evidencias de la existencia de la materia y la energía oscuras, discutiendo por qué creemos que han de tener una naturaleza distinta de la materia y energía ordinarias. Asimismo, explicaremos los experimentos presentes y futuros para tratar de detectarlas de forma más directa. Y nos adentraremos en las fascinantes especulaciones actuales para intentar entender el porqué de su existencia. Todo esto nos llevará a repasar nuestra comprensión actual del origen y evolución del universo, y a exponer modelos de nueva física que podrían ayudar a contestar estas —y otras— cuestiones esenciales aún sin respuesta. Como veremos, algunas de esas especulaciones podrían significar otra nueva revolución copernicana, aún más extrema que las que hemos mencionado.

CAPÍTULO 1

La materia oscura

Todas las estrellas que podemos observar a simple vista son una pequeña muestra de nuestra galaxia particular: la Vía Láctea. En esta imagen vemos un dibujo de la Vía Láctea, tal como se observaría vista “desde arriba” y “de perfil”. En ella se aprecian sus partes principales: un denso núcleo galáctico de forma esferoidal y un disco aplanado formado por brazos espirales, en uno de los cuales se encuentra el Sol.



En la figura 1 vemos una foto de la galaxia espiral NGC 3953, parecida a la Vía Láctea. Las galaxias tienen formas y

tamaños diversos, y, además de estrellas, contienen grandes cantidades de polvo y gas.

La Vía Láctea tiene unos cien mil millones de estrellas. Si las contáramos al ritmo de una por segundo, tendríamos que estar tres mil años contando ininterrumpidamente. Su tamaño es también colosal: cien mil años luz de diámetro, es decir, la luz necesita viajar durante cien mil años para ir de punta a punta. Es fácil entender que se trata de una distancia gigantesca, pero resulta realmente difícil hacerse una idea de hasta qué punto es así. Imaginemos que queremos hacer una maqueta de la Vía Láctea a escala casera. Para ello representamos el Sol con una canica de un centímetro de diámetro. A esa escala, la Tierra sería una mota de polvo, tan fina como el grosor de un cabello humano, a un metro de la canica (el Sol). La estrella más próxima al Sol es Alfa-Centauri, a 4,3 años luz. Tendríamos que representarla con una segunda canica[2]… ¡a 300 kilómetros de la primera! La escala casera se habría convertido en "escala geográfica". Y ahora tendríamos que seguir poniendo cien mil millones de canicas más. La nube de canicas resultante tendría un diámetro ¡de siete millones de kilómetros!, unas 18 veces la distancia de la Tierra a la Luna.

Como hemos dicho, la Vía Láctea es sólo una entre muchas galaxias. Actualmente, se conoce la existencia de más de 100.000 millones. Las galaxias tienden a estar agrupadas en *cúmulos de galaxias*, de diversas dimensiones. Los cúmulos son sistemas estables, ligados por la atracción gravitato-

ria.

Intuitivamente, podría parecer que el universo es un lugar esencialmente estático, en el que las estrellas y las galaxias flotan inmutables, como lámparas colgadas en un gran salón. Sin embargo, el universo es un lugar dinámico, incluso violento, en el que suceden muchos fenómenos interesantes. Para empezar, las estrellas y las galaxias se mueven a velocidades vertiginosas, y la forma en que lo hacen nos proporciona una información valiosísima sobre la estructura del universo, y también sobre su origen y su futuro, como vamos a ir comprobando. Además, en el universo se observan hechos muy llamativos, como estrellas que nacen, estrellas que explotan, choques de galaxias e, incluso, de cúmulos de galaxias. Todos estos hechos, inteligentemente analizados, aportan también información básica trascendental. Y ahí no acaba la cosa. Las estrellas y otros objetos del universo emiten luz de diversos tipos. Del análisis de esta luz, y de las modificaciones que sufre en su camino hasta la Tierra, se puede extraer información esencial y extraordinariamente rica sobre el universo. Y todavía hay más fuentes de información. Indudablemente, la forma ingeniosa en que los científicos han utilizado las observaciones para extraer conclusiones sobre el universo es una historia apasionante que vamos a ir visitando.

Las huellas de la materia oscura

En 1821, Alexis Bouvard detectó anomalías en la órbita

de Urano, el planeta más lejano conocido en aquellos tiempos. En apariencia, su movimiento contradecía la ley de Newton, que tantos éxitos había tenido. Bouvard sugirió que los extraños movimientos se debían a la influencia gravitatoria de algún otro cuerpo aún sin descubrir. En la década de 1840 los matemáticos Adams y Le Verrier, de forma independiente, calcularon la órbita de un octavo planeta que podía ser responsable de las desviaciones de Urano. Y en 1846 el astrónomo J. G. Galle descubrió el nuevo planeta, que sería bautizado como Neptuno, casi en el lugar exacto predicho por Le Verrier.

Esta historia es semejante a la que está sucediendo ahora mismo con la materia oscura. Ya en los años veinte y treinta del siglo XX, Jeans, Kapteyn y Oort (por separado) señalaron que las estrellas exteriores de la Vía Láctea se movían con velocidades "excesivas", teniendo en cuenta la fuerza gravitatoria que ejercía sobre ellas la materia visible (luminosa) de la galaxia. Por ello, sugirieron alguna forma de materia oscura en la Vía Láctea que proporcionara una fuerza gravitatoria extra. No se pensaba en ese momento en la materia oscura tal y como la entendemos ahora, sino más bien en estrellas poco o nada luminosas, o en gas y polvo interestelar. En 1933, Fritz Zwicky publicó un trabajo pionero en el que investigaba las velocidades de las galaxias (no de las estrellas individuales) del cúmulo de Coma: un grupo de unas 1.000 galaxias ligadas por fuerzas gravitatorias. Zwicky encontró que la velocidad promedio de las galaxias era

10 veces mayor que la esperada. En otras palabras, la atracción gravitatoria debida a la masa visible de las galaxias no bastaba para mantener el grupo unido. Si fuera sólo por esa masa, el cúmulo de Coma debería haberse deshecho hacía mucho tiempo, igual que, al girar violentamente un paraguas mojado, las gotas de agua salen disparadas. Es exactamente lo que le sucedería a nuestro sistema solar si los planetas multiplicaran por 10 sus velocidades: todos se saldrían de sus órbitas y escaparían de la atracción del Sol. Esto condujo a que Zwicky propusiera la existencia de una enorme cantidad de "materia oscura" (nuevamente en el sentido de no-luminosa), que proporcionara la atracción gravitatoria extra que se requería. Volviendo a nuestra primera historia, del mismo modo que los extraños movimientos de Urano revelaron la existencia de Neptuno antes de que fuera observado, los movimientos anómalos de las estrellas y las galaxias revelaban la existencia de una materia oscura aún sin detectar.

A pesar de que, visto desde la perspectiva actual, el trabajo de Zwicky era convincente, lo cierto es que fue ignorado durante 40 años, para irritación de su autor. Las primeras indicaciones sistemáticas de la presencia de materia oscura, tomadas finalmente en serio por la comunidad científica, datan de los años setenta. En 1975, la joven astrónoma Vera Rubin, junto con Kent Ford, presentó el sorprendente descubrimiento de que las estrellas de la periferia de las galaxias se movían con velocidades muy parecidas, independiente-

mente de su distancia del centro de la galaxia. Para entender lo chocante de esta observación, pensemos por un momento en nuestro sistema solar. A partir de la ley de Gravitación Universal de Newton, se puede deducir la velocidad v de un planeta orbitando circularmente a una distancia r de una gran masa M (la masa del Sol). El resultado es:

$$v = \sqrt{\frac{GM}{r}}$$

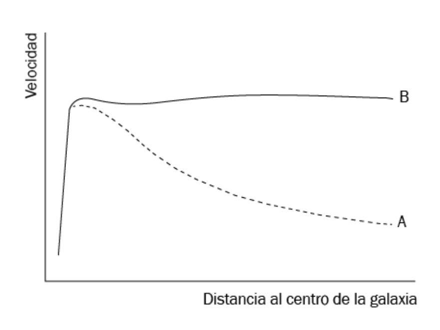
donde G es la constante de gravitación de Newton. El punto importante para nosotros es que, al estar r en el denominador, las velocidades de rotación de los planetas van disminuyendo a medida que nos alejamos del Sol. Esto está ilustrado en esta pequeña tabla, con las distancias al Sol de algunos planetas y sus velocidades, que se ajustan perfectamente a la predicción de la ley de Newton.

Planeta	Distancia al Sol (millones de kilómetros)	Velocidad (kilómetros/ segundo)
Mercurio	$r = 58$	$v = 48$
Tierra	$r = 150$	$v = 30$
Júpiter	$r = 778$	$v = 13$
Neptuno	$r = 4.498$	$v = 5,5$

Supongamos ahora que descubrimos un sistema planetario semejante al nuestro, orbitando alrededor de otra estrella, pero, al medir las velocidades de los planetas, encontramos que todos se desplazan aproximadamente con la misma

rapidez, *independientemente de su distancia a la estrella*. Esto sería sorprendente. ¿Qué podríamos deducir de una observación así? Habría dos posibilidades: o bien la ley de Newton no sería válida en ese hipotético sistema solar, o bien habría un gran halo de materia no visible alrededor de la estrella. De este último modo, la masa central M, que atrae a cada planeta, iría aumentando con la distancia, compensando la r del denominador en la ecuación de arriba. Esto es semejante a lo que sucede con la Tierra y su atmósfera. Nosotros sentimos la atracción de la gran esfera terrestre que está bajo nuestros pies. Sin embargo, un objeto situado a 20 kilómetros de altura siente la atracción de una masa ligeramente mayor, ya que el "halo atmosférico" completo está también bajo sus pies, atrayéndolo. En el caso de la Tierra, la atmósfera aporta muy poco porcentaje de masa, y el efecto es muy pequeño, pero existe. En nuestro sorprendente sistema solar imaginario, una gran "atmósfera" de materia invisible alrededor de la estrella haría que el crecimiento de M con la distancia fuera importante, compensando así el alejamiento del planeta y permitiendo que la velocidad de los planetas fuera siempre la misma[3].

Una situación así es exactamente la que encontraron Rubin y Ford al estudiar las velocidades de estrellas individuales a distancias diversas del centro de las galaxias. Dichas velocidades están esquemáticamente representadas en este gráfico para una galaxia típica.



La curva A representa lo que esperaríamos si la galaxia sólo contuviera materia ordinaria (fundamentalmente estrellas —con sus planetas—, y también una cierta cantidad de gas y polvo). La velocidad de rotación debería disminuir con la distancia, como sucede con los planetas de nuestro sistema solar. La curva B representa lo que realmente se mide: la velocidad de rotación de las estrellas depende muy poco de la distancia, sugiriendo la existencia de un gran halo de materia oscura que rodea la galaxia en todas las direcciones, en analogía con el anterior sistema solar imaginario. Las observaciones de Rubin y Ford han sido confirmadas en muchas ocasiones y con muchas galaxias distintas. Se podría objetar que la ecuación de arriba sólo sirve para órbitas circulares, y que las estrellas pueden estar siguiendo órbitas elípticas. Pero, para una órbita elíptica, la ecuación sigue siendo válida en promedio. Como las observaciones se hacen sobre muchas estrellas, la ecuación es estadísticamente válida y el argumento también.

Este método de explorar la materia oscura es potente, pero tiene limitaciones: sólo podemos estudiar la distribución

de materia oscura hasta distancias del centro de la galaxia donde haya estrellas orbitando. Como a distancias muy lejanas apenas hay estrellas, no se puede deducir la forma completa del halo de materia oscura. Pronto veremos otros métodos que permiten salvar esta dificultad.

Una hipótesis conservadora

En la sección anterior hemos establecido un paralelismo entre el caso de Neptuno y el de la materia oscura. Resulta interesante pensar un poco más sobre las semejanzas entre las dos historias, y también sobre las diferencias.

Cuando se observaron las anomalías en el movimiento de Urano, se podría haber pensado que se debían a que la ley de Newton no funcionaba a grandes distancias del Sol (recordemos que Urano era el planeta más lejano conocido). Sin embargo, Bouvard, Adams y Le Verrier formularon una hipótesis más conservadora para explicarlas: la existencia de un nuevo planeta, aún no descubierto. Renunciar a la ley de Newton, o corregirla, hubiera sido un salto conceptual mucho mayor. La ley de Newton se consideraba entonces una ley básica de la naturaleza. Por supuesto, en ciencia no hay nada sagrado y las leyes básicas se han de modificar cuando las observaciones experimentales así lo exigen. Pero eso supone una revolución científica. A su lado, la hipótesis alternativa de un nuevo planeta es sumamente inocente. La hipótesis de la materia oscura está exactamente en la misma línea: es la más conservadora posible. La alternativa sería

suponer que la ley de Newton no funciona a escalas galácticas.

¿Es la actitud conservadora la más correcta o "científica"? Ciertamente, la historia enseña que muchos fenómenos aparentemente contradictorios con las leyes físicas conocidas en su momento pudieron ser finalmente entendidos sin modificar dichas leyes, una vez se tuvieron en cuenta factores no considerados previamente (por error o desconocimiento). Por ello, la actitud escéptica suele tender a hipótesis conservadoras. Sin embargo, la ciencia no es sólo escepticismo, sino también audacia e imaginación. Y a veces los fenómenos extraños han supuesto realmente una señal de que las leyes físicas "vigentes" debían ser revisadas. Un ejemplo de esto nos lo da otro planeta del sistema solar: Mercurio. A comienzos del siglo XX se sabía que la órbita de Mercurio no era estable (como predice la ley de Newton), sino que presentaba una extraña *precesión*: el punto más alejado de la órbita se iba desplazando ligerísimamente a cada nueva vuelta del planeta. El desacuerdo con la teoría era minúsculo, semejante a una aguja horaria que se retrasara un segundo cada 70 años. Se podía suponer, conservadoramente, que las diminutas perturbaciones de Mercurio se debían a las fuerzas gravitatorias ejercidas por otros objetos del sistema solar, tal como sucedió con Urano. Pero resultó que se debían a que la ley de Newton no era exacta. Para entender las anomalías fue necesaria una nueva teoría, la Relatividad General de Einstein (1915), que corregía la teo-

ría de Newton y daba cuenta exactamente del movimiento de Mercurio, tal como demostró el propio Einstein. Para Mercurio, la hipótesis audaz fue la correcta, y comprender su misterioso movimiento exigió dar un paso de gigante en nuestra comprensión básica de la naturaleza.

Volviendo a nuestro caso, los movimientos anómalos de estrellas y galaxias pueden deberse a la existencia de grandes cantidades de materia oscura (ésta es la hipótesis conservadora)…, o bien a que la ley de Newton falla clamorosamente a grandes distancias, lo cual implicaría una revolución de las bases de la física[4]. De hecho, ambas alternativas han sido consideradas en profundidad dentro de la comunidad de físicos, y ésta es realmente la situación más eficaz. Hay que tener en cuenta que los científicos no formulan sus hipótesis siguiendo ninguna consigna, sino con total libertad y siguiendo su propia intuición. Al haber distintas actitudes e hipótesis compitiendo, acaba prevaleciendo la que es más potente para explicar y predecir las observaciones (que al final son las que inclinan la balanza en favor de alguna de ellas). Pronto veremos que la alternativa de modificar las leyes de la gravitación difícilmente puede explicar todas las observaciones, por lo que la hipótesis de la materia oscura es, sin duda, la más plausible.

Una diferencia entre el caso de la materia oscura y el de Neptuno es que la materia oscura no es una hipótesis tan inocente como la de un nuevo planeta. La materia oscura es un descubrimiento mucho más importante que el de Nep-

tuno. Para empezar, representa la mayor parte de la materia de una galaxia (y del universo). Y, además, como veremos, no puede tratarse de materia ordinaria (al contrario que Neptuno). O sea, ¡al final la materia oscura también exige "nueva física"! Otra diferencia, la más importante por ahora, es que Neptuno fue efectivamente descubierto y la materia oscura aún no ha sido detectada directamente. Más adelante mencionaremos los intentos que se están realizando para conseguirlo. Pero hay que decir que, a pesar de esta carencia, las evidencias a favor de la materia oscura son abrumadoras. A falta de una detección directa, la materia oscura revela su presencia indirectamente, pero tozudamente, en ámbitos muy distintos y de formas muy diversas. A continuación repasamos algunas de estas evidencias complementarias.

Cúmulos de galaxias

Hemos mencionado que ya en los años treinta Zwicky señaló que el cúmulo de Coma debía de tener mucha más materia que la aparente para que las galaxias que lo forman se mantuvieran unidas. En la actualidad, las medidas del movimiento de galaxias en cúmulos son mucho más precisas y abundantes, y, efectivamente, todas conducen a la necesidad de materia oscura para que dichos cúmulos sean estables. En realidad, hoy sabemos que la contribución de las galaxias al total de *materia ordinaria* de un cúmulo galáctico es muy pequeña. En los grandes cúmulos, como el de Coma,

esa contribución es —típicamente— del 7%. El resto de la materia ordinaria está en forma de gas caliente, ocupando el espacio intergaláctico. Este gas es fundamentalmente hidrógeno y helio, y más adelante nos referiremos a su origen. En los años treinta no era posible observarlo, pero en la actualidad sí puede hacerse gracias a la emisión de rayos X que produce. El estudio de esta emisión permite además determinar la abundancia del gas y la temperatura a la que se encuentra. Esto está ilustrado en la figura 2: una foto del gran cúmulo de galaxias Abell 1689, que se encuentra a 2.200 millones de años luz. En él vemos cientos de galaxias y una especie de nube violeta que las envuelve.

Esa nube es una imagen en falso color de la emisión en rayos X del cúmulo, es decir, una "radiografía" del mismo, que muestra la gran nube de gas intergaláctica. El gas se encuentra a 100 millones de grados (ésa es la razón por la que emite rayos X) y contiene mucha más masa que las galaxias individuales, tal como hemos dicho antes.

Sin embargo, aun teniendo en cuenta el gas intergaláctico, la materia ordinaria de los cúmulos no sería suficiente por sí sola para evitar que las galaxias escapen de los mismos. La situación es semejante a la que encontrábamos en las galaxias individuales al examinar las velocidades de las estrellas periféricas. En ambos casos hace falta una enorme componente de materia oscura para mantener los sistemas ligados. El "reparto" de masa entre los distintos tipos de materia en un gran cúmulo típico es: 85% de materia oscura,

14% de gas caliente y 1% de estrellas. Y, grosso modo, éste es también el reparto en el universo como un todo (no estamos considerando en este reparto a la energía oscura).

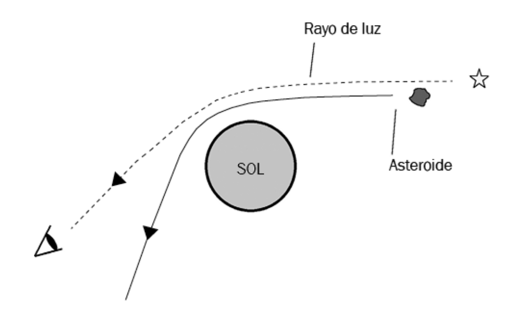
¿Por qué está tan caliente el gas de un cúmulo de galaxias? La temperatura es una manifestación de la agitación de los átomos que componen una sustancia. A mayor agitación (es decir, a mayores velocidades de los átomos), mayor temperatura. Los átomos de gas en un cúmulo se mueven a enormes velocidades, debido precisamente a la atracción gravitatoria que los acelera. Por ello, el gas está a una gran temperatura. Esto no quiere decir que, si saliéramos al espacio intergaláctico, fuéramos a encontrar una "atmósfera" muy caliente. El gas, aunque muy caliente, está extraordinariamente diluido, por lo que ni siquiera notaríamos su presencia. Lo que percibiríamos es un espacio intergaláctico extremadamente vacío y a una temperatura bajísima, cercana al cero absoluto de temperaturas.

La nube de gas de un cúmulo de galaxias nos da, de hecho, otra prueba adicional de la presencia de materia oscura. A los átomos del gas caliente les pasa exactamente igual que a las galaxias: van tan rápido que la atracción de la masa ordinaria del cúmulo (incluyendo al propio gas) no podría retenerlos. La nube de gas debería haberse evaporado. Pasaría algo parecido a lo que sucede en la Luna. Ésta no tiene atmósfera porque, debido a su pequeña masa, la atracción gravitatoria que produce no es suficiente para atrapar gas a la temperatura reinante en su superficie, originada en

este caso por la radiación solar. La Tierra sí posee masa suficiente, de ahí que tenga una atmósfera. Pues bien, en los cúmulos galácticos la masa de la materia ordinaria no es, ni de lejos, suficiente para mantener atrapada su "atmósfera" de gas caliente. Ahí debe haber más masa y ésa es la materia oscura. Es interesante que las estimaciones de la cantidad de materia oscura en un cúmulo a partir del movimiento de las galaxias y a partir de la temperatura de la nube de gas sean consistentes entre sí, lo que da solidez complementaria a estas evidencias en favor de la materia oscura.

Lentes gravitacionales

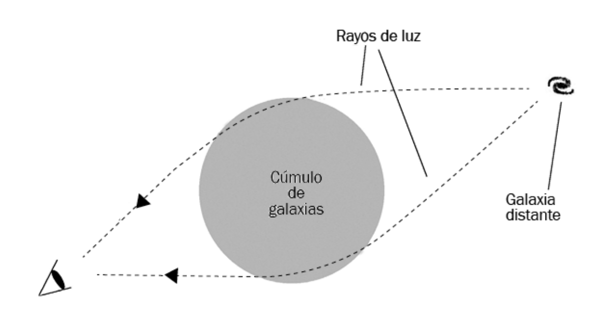
Hemos mencionado que la teoría de la gravedad de Newton fue reemplazada a comienzos del siglo XX por la Teoría de la Relatividad General de Einstein. En la mayoría de los ejemplos prácticos, las predicciones de ambas teorías son indistinguibles, pero hay casos interesantísimos en las que difieren. En esas ocasiones, la naturaleza siempre ha escogido comportarse de acuerdo con la teoría de Einstein. Anteriormente, cuando mencionamos la precesión de la órbita de Mercurio, nos encontramos con uno de estos casos. Otro caso importante es el comportamiento de la luz al pasar cerca de una gran masa. La Relatividad General predice que los rayos de luz se han de curvar, de forma análoga a como lo hace la trayectoria de un objeto material, por ejemplo un asteroide. Esto está ilustrado en el siguiente dibujo:



La teoría da una predicción precisa de *cuánto* se ha de curvar el rayo de luz, dependiendo de la masa que lo atrae. Esta consecuencia asombrosa de la Relatividad General se comprobó por vez primera aprovechando un eclipse de Sol en 1919, un acontecimiento científico que, por cierto, tuvo una gran resonancia popular. En el dibujo anterior vemos la trayectoria de un asteroide al pasar cerca del Sol. Su trayectoria se curva debido a la atracción gravitatoria. La línea discontinua representa un rayo de luz emitido por una estrella lejana. Su trayectoria también se curva. De este modo, la luz de una estrella, que en principio está tapada por el Sol, puede llegar hasta un observador en la Tierra. Una comprobación de este fenómeno ha de hacerse durante un eclipse total de Sol, para que la luz de la estrella sea distinguible sobre el fondo oscuro. En todos los casos estudiados, las observaciones se han ajustado siempre con precisión a las predicciones de la teoría.

Naturalmente, si la masa del Sol fuera mayor, la curvatura producida en el rayo sería más acusada. Consideremos

ahora un cúmulo de galaxias muy masivo. Al igual que el Sol, este cúmulo curvará los rayos de luz provenientes de objetos muy lejanos, por ejemplo galaxias muy distantes situadas “detrás” del cúmulo. El fenómeno ha sido repetidamente observado y es muy espectacular. Esto no sólo nos da otra prueba más de la teoría de Einstein, sino que nos permite determinar la masa total del cúmulo en cuestión, estudiando *cuánta* es la curvatura que produce en los rayos. Este efecto se llama de “lente gravitacional”, ya que provoca una acción en los rayos de luz parecida a la que produce la lente de una lupa común o una esfera de cristal. Se puede apreciar en este dibujo esquemático:



Notemos en este dibujo que el observador ve llegar la luz de la galaxia por dos direcciones distintas. Por tanto, ve dos imágenes separadas de la galaxia distante. En general, la lente gravitacional produce imágenes múltiples y distorsionadas de las galaxias lejanas. Típicamente, objetos aparentemente puntuales pueden ser deformados en forma de múltiples arcos. Nuevamente, el efecto es parecido al que

produciría una gran esfera de cristal. Una ilustración de este fenómeno puede observarse en la figura 2, que muestra el gran cúmulo de Abell 1689. Mirando con atención se pueden observar arcos, que corresponden a imágenes múltiples y distorsionadas de galaxias muy distantes, situadas muy por detrás del cúmulo. Otra demostración espectacular del efecto de lente gravitacional se puede apreciar en la figura 3. En ella vemos el cúmulo 0024+1654 y las imágenes múltiples que produce de una galaxia mucho más lejana (en azul).

El punto importante para nosotros es que, examinando estas imágenes, es posible realizar un mapa tridimensional de la distribución de masa en el cúmulo causante de las mismas. Y nuevamente se encuentra que en el cúmulo hay mucha más masa que la aparente. Si fuera sólo por las estrellas de las galaxias y el gas intergaláctico, el efecto de lente gravitacional sería mucho menor. Estas imágenes confirman la presencia de una materia invisible (materia oscura), que es la principal responsable del efecto. Además, las estimaciones de la cantidad de materia oscura a partir del estudio de este fenómeno son plenamente consistentes con las realizadas a partir de los movimientos de galaxias individuales y a partir de la nube de gas caliente. Todo ello refuerza enormemente la hipótesis de la materia oscura.

El fenómeno de lente gravitacional puede observarse también en galaxias individuales. En todos los casos, además de dar una prueba elegante de la presencia de materia

oscura, permite examinar su distribución en zonas donde no hay materia visible moviéndose (estrellas periféricas o gas). De este modo, se ha podido estudiar la forma completa del halo de materia oscura de las galaxias, hasta regiones muy alejadas del centro de las mismas.

El cúmulo de la Bala

Para terminar, por el momento, nuestra lista de evidencias a favor de la materia oscura, vamos a discutir brevemente una observación reciente (2006) de gran importancia. Hemos mencionado la posibilidad alternativa de no postular ninguna materia oscura, sino modificar las leyes de la gravitación a grandes distancias. Sin embargo, el llamado cúmulo de la Bala (*Bullet Cluster*) arroja pistas en contra de esta opción.

El cúmulo de la Bala se trata, en realidad, de dos cúmulos de galaxias en proceso de choque. Es, por tanto, una colisión de sistemas colosalmente grandes (recordemos el tamaño descomunal de una sola galaxia individual). El choque no es sólo gigantesco en la escala espacial, sino también en la temporal: los cúmulos en cuestión llevan cientos de millones de años atravesándose. En la figura 4 vemos una foto del cúmulo de la Bala. En ella observamos dos manchas de color rosado, que son la imagen en rayos X del sistema. Esas manchas son, por tanto, las nubes de gas caliente de los dos cúmulos, que se alejan del centro, después de haberse atravesado una a la otra. Como de costumbre, hay mucha más

masa ordinaria en ese gas caliente que en las galaxias individuales.

La velocidad de estas nubes es extraordinaria. Por ejemplo, la nube de la derecha se aleja a 4.500 kilómetros por segundo del centro del sistema. Además, tiene una forma que recuerda a una bala atravesando el aire, lo que ha dado nombre al conjunto. El primer punto importante que se debe notar es que la mayoría de las galaxias de los dos cúmulos están más alejadas del centro que las correspondientes nubes de gas (lo que es especialmente visible en el cúmulo de la izquierda). Esto es lógico. Las galaxias de un mismo cúmulo están muy separadas unas de otras. Si fuera sólo por ellas, los cúmulos se podrían atravesar sin apenas interaccionar, como los transeúntes en una avenida casi desierta prosiguen su camino sin chocar con los escasos transeúntes que circulan en sentido contrario. Sin embargo, las nubes de gas sí sufren una fricción entre ellas. Esta fricción, además de elevar la temperatura del gas enormemente, ha provocado que las nubes hayan perdido velocidad, quedando retrasadas respecto a las galaxias, como se observa en la foto. Ésta es una situación singular, en la que las nubes de gas intergaláctico y las galaxias individuales se han separado espacialmente.

Ahora viene el punto crucial: ¿qué ha pasado con la materia oscura? (si es que ésta existe). Para verlo se puede realizar un estudio del comportamiento del sistema como lente gravitacional. Sabemos que esto permite realizar un mapa

de la masa total presente, independientemente de su naturaleza. Si uno admitiera la hipótesis de que *no* hay materia oscura, y en su lugar aceptara alguna modificación de las leyes de la gravitación, entonces el efecto de lente gravitacional (con la intensidad que fuera) debería notarse especialmente en la zona donde hubiera mayor masa, que en ese caso serían las nubes de gas. Sin embargo, eso no es lo que sucede. Un estudio de la distribución de masa, a partir del efecto de lente gravitacional, indica que la mayor parte de la materia está localizada en la misma zona que las galaxias individuales, como se ilustra en la figura 5, donde las nubes azules representan la masa responsable del efecto de lente.

La conclusión es que la mayor parte de la materia (las nubes azules) ha proseguido su camino sin interaccionar, tal como le ha pasado a las galaxias. Esta figura demuestra que la componente mayoritaria de la masa del cúmulo no es el gas (ni las estrellas de las galaxias, que aún suponen menos masa), sino una sustancia distinta. Además, nos da alguna pista sobre la naturaleza de la materia oscura. Concretamente, nos dice que la materia oscura no sólo interacciona poco con la materia ordinaria (excepto por sus efectos gravitatorios), razón por la que no conseguimos detectarla, sino que además la materia oscura interacciona poco entre sí, o al menos no lo hace como un gas ordinario. De lo contrario, no se atravesaría a sí misma con esa facilidad.

El cúmulo de la Bala es, posiblemente, la evidencia más directa que tenemos de la existencia de materia oscura. Es

casi una fotografía directa de ella. Y no es el único testimonio de este tipo: el análisis de otros choques de cúmulos galácticos (como el MACS J0025.4-1222) muestra también una separación entre las nubes de gas y la materia oscura, parecida al cúmulo de la Bala.

¿Materia oscura o invisible?

En los epígrafes anteriores hemos hablado indistintamente de materia oscura y materia invisible, pero, por todo lo expuesto, está claro que el término "materia invisible" (o "materia transparente") sería más acertado que el ya establecido de materia oscura.

Esta reflexión trae a la mente las numerosas ocasiones en las que el cine ha tratado el tema de la invisibilidad. En la película clásica *El hombre invisible* (James Whale, 1933), basada en la novela de H. G. Wells, el protagonista descubre un método para volverse invisible (¡que lo convierte también en asesino!). Al final, la policía lo descubre por las pisadas que deja sobre la nieve. Hay un curioso paralelismo entre esa escena y nuestra invisible materia oscura. En ambos casos, la materia invisible se hace notar por sus efectos gravitatorios (el peso del cuerpo invisible es el que produce la huella sobre la nieve). Sin embargo, hay alguna diferencia. Un hombre "hecho de materia oscura" sentiría la atracción de la Tierra como una persona normal..., pero no dejaría huellas. Éstas están producidas, además de por el peso, por la impenetrabilidad de los cuerpos hechos de materia

ordinaria. Y esa impenetrabilidad está causada por la interacción (de origen electromagnético) entre las nubes de electrones de los átomos que los componen. Lo que hemos visto es que la materia oscura posiblemente interacciona muy poco con la materia ordinaria, razón por la que nos cuesta tanto detectarla. Por tanto, lo más probable es que un hipotético objeto de materia oscura cayera hacia el centro de la Tierra sin sentir apenas oposición: nuestra materia ordinaria también sería, para él, invisible y casi imposible de detectar.

Existe otro paralelismo entre la escena mencionada y la materia oscura. Un hombre invisible deja un rastro sobre la nieve que puede ser observado mucho después de producirse. Del mismo modo, la materia oscura ha dejado un rastro en la evolución del universo que podemos observar en la actualidad. Es ese rastro el que nos sugiere fuertemente que ha de tratarse de una materia esencialmente distinta a la ordinaria. Pero para poder discutir esto, hemos de realizar primero un viaje a los orígenes del universo.

CAPÍTULO 2

Un viaje por el espacio y el tiempo

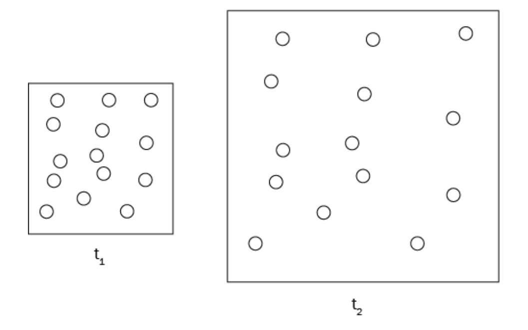
¿Cuándo comenzó el universo y cómo ocurrió? ¿Cuál es su futuro? ¿Dónde están sus límites?... A pesar de ser inquietudes muy antiguas, hasta el siglo XX (o sea, ayer mismo en términos históricos) no ha sido posible aproximarse a estos misterios de un modo científico. Los hallazgos en este terreno son, indudablemente, uno de los grandes éxitos intelectuales de los últimos cien años (y de toda la historia), aunque aún quede mucho por entender.

En este capítulo vamos a realizar un viaje al origen y los límites del universo. Lo que aprendamos será clave para entender cómo la materia y la energía oscuras han marcado su evolución y han dejado una huella visible en el mismo.

La gran explosión

Como dijimos en el capítulo anterior, el universo es un lugar dinámico en el que se observan muchos fenómenos interesantes. Y hay uno que tiene una importancia crucial: el universo está en *expansión*. Es decir, cuando miramos las galaxias lejanas, vemos que se alejan de nosotros a enormes velocidades. Pero no hay que pensar que nuestro punto de

vista es privilegiado. No es que nosotros (la Vía Láctea) estemos inmóviles en el centro del universo, mientras el resto de objetos retrocede ante nosotros. Desde cualquier otra galaxia observaríamos lo mismo. Esto está ilustrado en el siguiente dibujo, que representa un grupo de galaxias en un instante t_1 de la historia del universo, y el *mismo* grupo en un instante posterior, t_2.



Lo que vemos es una especie de ampliación fotográfica de las posiciones relativas entre las galaxias. Si nos imaginamos situados en *cualquiera* de ellas, lo que observaremos es que entre el instante t_1 y el instante t_2 las galaxias que nos rodean se han alejado de nosotros. Una expansión de este tipo se denomina homogénea (igual para todos los puntos) e isótropa (igual en todas las direcciones). Es fácil comprobar, mirando ese dibujo, que, entre los dos instantes considerados, las galaxias que estaban inicialmente más lejanas se han alejado una distancia neta mayor. En otras palabras, la velocidad de alejamiento entre dos galaxias es proporcional

a la distancia que las separa. Ésta es la marca de una expansión homogénea e isótropa, y esto es precisamente lo que se observa en el universo. La constante de proporcionalidad (llamada constante de Hubble) es de unos 20 km/s por cada millón de años luz de distancia. Así, una galaxia situada a 100 millones de años luz se aleja de nosotros a unos 2.000 km/s; una galaxia a 3.000 millones de años luz se aleja a unos 60.000 km/s, etc. Se trata, como vemos, de velocidades de auténtico vértigo.

¿Por qué se expande el universo? Para ganar alguna intuición sobre ello, hagamos el siguiente juego mental. "Rebobinemos" en el tiempo la película de la historia del universo. En esta película invertida, la expansión aparece como una contracción. Las galaxias aparecen cada vez más juntas a medida que nos remontamos a épocas más remotas. Y llega un momento en que todas se juntan en un punto. Utilizando el valor de la constante de Hubble, mencionado arriba, podemos estimar que ese momento ocurrió hace unos 14.000 millones de años. Si en ese punto detenemos la película y volvemos a correrla hacia adelante, lo que veremos es que hace 14.000 millones de años tuvo lugar una explosión gigantesca, el famoso Big Bang. En esta imagen intuitiva, el universo actual se sigue expandiendo como continuación de la explosión inicial. Es decir, en cierto modo, el universo sigue explotando ahora mismo y nosotros somos un diminuto fragmento dentro de esa explosión. Naturalmente, la pregunta que surge es: ¿por qué se produjo ese Big

Bang?, cuestión que dejamos para más adelante.

La teoría

Tal como acabamos de presentarla, la célebre teoría del Big Bang parece una hipótesis construida a partir de una observación: la expansión del universo. Pero las cosas no sucedieron así, sino más bien al contrario, lo que resulta aún más interesante. Los físicos fueron capaces de llegar al concepto de expansión del universo y de Big Bang *antes* de que la expansión cósmica fuera observada. De hecho, fueron capaces de llegar a estas conclusiones sensacionales, simplemente razonando sobre unas cuantas ecuaciones escritas en una hoja de papel. Veamos de forma resumida cómo sucedió.

En 1915, Albert Einstein era ya un físico mundialmente famoso, con un historial de éxitos científicos al nivel de los más grandes de la historia. Hacía diez años que había propuesto la Teoría de la Relatividad Especial, que, entre otras cosas, conducía a su célebre relación $E = mc^2$. Pero su máxima contribución a la ciencia, la Teoría de la Relatividad General, iba a llegar en ese año de 1915, después de ocho años de intenso trabajo. La ecuación principal de esta teoría no es tan famosa como $E = mc^2$, pero seguramente es aún más profunda y revolucionaria:

$$R^{mn} - \frac{1}{2} g^{mn} R = T^{mn}$$

Posiblemente, a muchos lectores estos signos les resulten incomprensibles. No obstante, esta ecuación es la herramienta básica de la cosmología moderna, es decir, de la ciencia que estudia la estructura, el origen y la evolución del cosmos, y nos referiremos a ella en más de una ocasión. Por ello merece que discutamos brevemente su significado. En el miembro de la izquierda, los símbolos g^{mn}, R^{mn} representan la métrica y la curvatura del espacio-tiempo. Sin entrar en tecnicismos, estas cantidades indican cómo son el espacio y el tiempo. No son algo inerte, inmutable y "plano". El espacio-tiempo (como un todo) se asemeja más a un trozo de goma, que puede estirarse, contraerse, curvarse y retorcerse. Esta idea choca con nuestra intuición o sentido común (lo que hace a la teoría fascinante) y enseguida volveremos sobre ella. En el miembro de la derecha, el símbolo T^{mn} denota el tensor energía-momento. Nuevamente sin tecnicismos, esta cantidad representa la materia y la energía que hay en el universo (en realidad la materia no es más que energía extraordinariamente concentrada, como sabemos gracias a $E = mc^2$). Lo que nos dice la ecuación de arriba es que la forma del espacio y el tiempo está determinada por lo que hay en él (materia y energía). Todo esto son conceptos revolucionarios. Estamos acostumbrados a pensar en el espacio y el tiempo como el anodino e indiferente escenario de un teatro en el que los actores (es decir, los objetos que pueblan el universo) llevan a cabo su representación.

Esta ecuación nos dice que la forma del teatro (el espacio y el tiempo) está determinada por lo que hay dentro de él (materia y energía), y es algo cambiante. Concretamente, la ecuación predice que alrededor de grandes masas, como el Sol, el espacio-tiempo se curva de forma apreciable.

Por supuesto, los conceptos anteriores no son fáciles de visualizar. Estamos habituados a que una superficie curvada (por ejemplo la de una esfera) esté inmersa en un mundo de tres dimensiones. Y de la misma forma se podría pensar que un espacio de tres dimensiones curvado ha de estar necesariamente inmerso en un universo de cuatro o más dimensiones (ya de por sí imposible de visualizar). Pero estas limitaciones están sólo en nuestro cerebro. Matemáticamente, no hay ninguna dificultad para formular una superficie o un espacio curvos sin necesidad de sumergirlos en un mundo de dimensionalidad mayor. Lo que caracteriza a un espacio curvo es que está dilatado o contraído de forma desigual en diferentes regiones. ¿En qué se nota que el espacio-tiempo está curvado? La manifestación más directa es que las trayectorias de los objetos se aceleran y se curvan cerca de las grandes masas (donde la curvatura es más acentuada). Esto, en realidad, es algo muy familiar: es lo que habitualmente llamamos fuerza de gravedad (o campo gravitatorio). Así, pues, en la teoría de Einstein, la gravedad es simplemente la consecuencia de la geometría del espacio-tiempo.

La cantidad de información que hay contenida en la ecuación de Einstein es extraordinaria. Por ejemplo, la ley

de la gravedad de Newton, *mejorada*, está contenida en ella. Ejemplos de esa mejora los hemos encontrado ya en el capítulo anterior, cuando discutimos la órbita anómala de Mercurio y la curvatura de los rayos de luz provocada por lentes gravitacionales (por ejemplo, cúmulos de galaxias). En ambos casos, la fuerza de la gravedad no funcionaba exactamente como había previsto Newton, sino como lo había hecho Einstein.

De forma más general, si queremos estudiar la estructura y evolución del universo, debemos introducir en el miembro de la derecha de nuestra ecuación (T^{mn}) la materia y energía que el universo contiene. Entonces, la ecuación nos dirá cuál es el espacio-tiempo correspondiente y su evolución. Cuando esto se hace para un universo homogéneo, como el nuestro, se encuentra que, necesariamente, éste ha de pasar por una fase de expansión; es decir, el espacio mismo (con todo su contenido) ha de expandirse, igual que se hincha un pastel en el horno. Vista con los ojos de la teoría de Einstein, la expansión del universo se produce porque el espacio entre las galaxias está dilatándose, o, en otras palabras, se está creando espacio entre ellas. Einstein se dio cuenta de estas implicaciones, pero en aquellos años las observaciones no eran todavía lo suficientemente buenas para ver la expansión cósmica: el universo parecía estático. En consecuencia, Einstein modificó su fórmula para hacerla compatible con un universo estático. Concretamente, añadió un término en el miembro de la derecha: el llamado término de la

constante cosmológica. Así, en vez de T^{mn}, ahora aparecía $T^{mn} + \Lambda g^{mn}$. El significado de Λ, visto con perspectiva moderna, es el de una energía asociada al propio espacio vacío. Cuando más tarde, en 1929, Hubble demostró que el universo se hallaba realmente en expansión, Einstein se lamentó, considerando que había cometido el mayor error científico de su vida, y “retiró” la constante cosmológica de su ecuación. Sin embargo, es posible que el lector o lectora haya reconocido en Λ el concepto de energía oscura (que trataremos con más detalle en el capítulo 5). Así que ¡la constante cosmológica ha regresado finalmente a la ecuación de Einstein! (aunque en una forma algo diferente a como él imaginó).

Pero volvamos a aquellas primeras décadas del siglo XX. Hubo otros físicos (inicialmente el ruso Alexander Friedmann y el belga Georges Lemaître) que tuvieron más fe que el propio Einstein en su ecuación original y predijeron con todo detalle que el universo debía atravesar una fase de expansión y haber surgido a partir de una gran explosión, posteriormente denominada Big Bang.

Las reliquias del pasado

La idea de una gran explosión inicial de la que surgió todo es tan extraordinaria que uno se pregunta inmediatamente qué pruebas tenemos de ella. ¿No podría ser todo una elucubración de los físicos? Antes de responder a esta pregunta, conviene recalcar que la teoría del Big Bang no es solamente una descripción cualitativa del comienzo del uni-

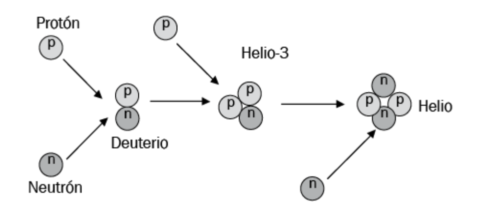
verso, sino una teoría *cuantitativa,* que nos ofrece una película detallada de la evolución del universo desde sus primeros instantes. Y una de las consecuencias más importantes de la teoría es que el universo primitivo estaba muy caliente. Esto no es sorprendente: todos sabemos que cuando la materia se comprime, se calienta. Alguna vez habrán observado, al hinchar la rueda de una bicicleta, que al comprimir el aire con el émbolo de la bomba de inflar, ésta se calienta. Análogamente, el universo primitivo estaba más concentrado y, por tanto, más caliente. La teoría nos dice con precisión cuál era la temperatura a la que se encontraba en cada momento. Además, a la materia, cuando se calienta, le suceden cosas. Todos sabemos que al calentar agua a 100º C, hierve y se transforma en vapor. Análogamente, a la materia de aquel universo primitivo le sucedieron, como veremos, cosas importantes en distintos instantes. Esto enlaza con nuestra pregunta anterior: ¿qué pruebas tenemos de que todo esto pasara realmente así? Ciertamente, no podemos ir hacia atrás en el tiempo para contemplar qué sucedió, ni podemos fabricar un nuevo Big Bang para estudiarlo. Los físicos proceden aquí de forma semejante a la de los geólogos. Un geólogo puede llegar a la conclusión teórica de que lo que ahora es un desierto, hace cien millones de años era un lago. No puede regresar en el tiempo para comprobarlo, pero si excavando a la profundidad adecuada encuentra fósiles de peces, habrá obtenido un respaldo importante a su teoría. De forma similar, podemos buscar en el

universo actual "fósiles" o reliquias de aquellos instantes iniciales. Y, efectivamente, si la teoría del Big Bang es correcta, ocurrieron dos acontecimientos trascendentales que han debido de dejar rastros observables hoy en día: la *nucleosíntesis primitiva* y la *Recombinación*. Y en el rastro que han dejado no sólo es perceptible con claridad el violento origen del universo, sino la "marca del lado oscuro", como pronto veremos. Por ello, merecen discusión aparte.

Nucleosíntesis primitiva

En el universo muy primitivo la temperatura era tan alta que las partículas que componen los átomos estaban desgajadas unas de otras. Recordamos aquí que los átomos están formados por un núcleo positivo, compuesto de protones y neutrones, y una corteza compuesta por electrones (de carga negativa). El núcleo más sencillo que existe es el del átomo de hidrógeno, formado por un solitario protón. Los demás núcleos contienen siempre protones y neutrones. Por ejemplo, el núcleo de un átomo de helio está compuesto por dos protones y dos neutrones. Pero en aquellos momentos iniciales los protones, neutrones y electrones estaban sueltos y se propagaban de forma independiente dentro de una sopa de fotones (partículas de luz) y partículas de otros tipos. Según la teoría del Big Bang, cuando el universo tenía unos 100 segundos de existencia, la gigantesca temperatura inicial había descendido a unos mil millones de grados; y sólo entonces se dieron las circunstancias adecuadas para

que algunos de esos protones y neutrones se fusionaran, dando lugar a *núcleos* de átomos más complejos (los electrones serían capturados más tarde). Durante unos minutos el universo entero funcionó como un gigantesco horno de fusión nuclear, produciéndose reacciones semejantes a las que ocurren en la explosión de una bomba nuclear (de fusión) o en el interior de las estrellas. Los protones y los neutrones que poblaban el universo se fusionaron, dando lugar a núcleos de elementos ligeros, como el mencionado helio, el deuterio (formado por un protón y un neutrón), el helio-3 (dos protones y un neutrón) o el litio (tres protones y cuatro neutrones). Algunos de estos procesos se ilustran en el siguiente esquema:



Además, muchos protones (es decir, núcleos de hidrógeno) quedaron sueltos, sin aparear con neutrones. Esta idea sensacional de que el universo muy primitivo fue una máquina de producción de elementos químicos se debe a Alpher y Gamow (1948). Desde aquella propuesta inicial, los cálculos se han refinado enormemente y en la actualidad es posible calcular detalladamente la abundancia relativa de los elementos ligeros creados. Según los cálculos más re-

cientes, por cada doce núcleos de hidrógeno se debió de crear uno de helio (más tarde todos estos núcleos formarían átomos). Las proporciones para los otros elementos son mucho menores: tres núcleos de deuterio y uno de helio-3 por cada cien mil de hidrógeno, y cinco de litio por cada diez mil millones de hidrógeno.

Pues bien, midiendo en el universo actual la abundancia de estos elementos, se encuentran porcentajes que concuerdan perfectamente (dentro de las incertidumbres teóricas y experimentales) con los números anteriores[5]. Esto representa un gran triunfo de la teoría. Las abundancias actuales de estos elementos juegan, por tanto, el papel de "fósiles" y dan un testimonio impresionante de lo ocurrido en épocas remotas, ¡cuando el universo tenía apenas unos minutos de existencia!

Es interesante mencionar que, además de esta producción inicial de elementos ligeros, en el universo existe otra fuente de producción de núcleos (ligeros y no tan ligeros): las estrellas. En el interior de las estrellas se lleva a cabo un proceso de nucleosíntesis que transforma el hidrógeno en helio y en otros elementos más pesados (todos hasta el hierro). Este proceso es el que libera la energía que emiten las estrellas. Los núcleos de elementos más pesados que el hierro (por ejemplo, el oro o el plomo) se han creado en condiciones de temperatura y densidad aún más extremas: las que se dan cuando las estrellas explotan, las llamadas *supernovas*. Así que la materia de la que estamos hechos fue en

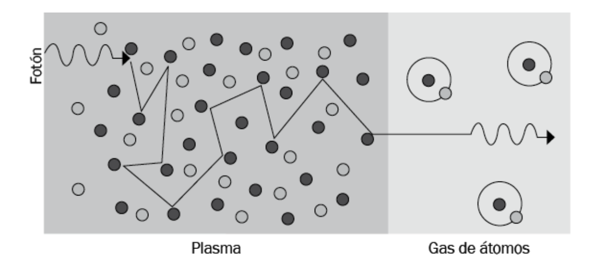
su mayor parte “cocinada” en el interior de una estrella. Pero cuando tocamos un anillo de oro, estamos tocando materia que se creó en la explosión de una estrella. Y cuando inflamos un globo de helio, la mayor parte de ese helio fue creado en los primeros minutos del universo. Por cierto, ¿cuándo se formó el hidrógeno inicial? Pronto volveremos sobre ello.

Recombinación y radiación de fondo

En 1964, dos jóvenes radioastrónomos, A. Penzias y R. Wilson, estaban tratando de reutilizar una antena de la compañía Bell Telephone (construida para comunicaciones por satélite) para detectar ondas de radio emitidas por nuestra galaxia. Penzias y Wilson, de forma concienzuda, se dedicaron primero a identificar todo el “ruido” e interferencias producidos por el propio sistema electrónico y por ondas de radio en la atmósfera de la Tierra. La idea era “descontar” todo ese ruido indeseable para quedarse sólo con la señal galáctica. Pero esta tarea preliminar resultó más difícil de lo previsto. Había un “ruido parásito” en la antena: una extraña radiación de microondas cuyo origen no conseguían identificar. Esta misteriosa radiación tenía propiedades sorprendentes: no cambiaba con la hora del día ni la estación del año; tampoco dependía de la orientación: por todas las direcciones llegaba exactamente la misma enigmática señal. Sin saberlo, Penzias y Wilson acababan de realizar el descubrimiento más importante para entender el origen del uni-

verso desde el hallazgo de la expansión cósmica, motivo por el que recibieron el Premio Nobel en 1978. Pero en un principio no comprendieron su importancia. En 1965, gracias a la labor intermediaria de destacados físicos, los resultados de Penzias y Wilson fueron interpretados a la luz de avances teóricos en cosmología y su importancia capital pudo ser reconocida. Esa misteriosa radiación parásita resultó ser un "eco luminoso" de la Gran Explosión. Veamos cómo se originó.

Después de la nucleosíntesis primitiva, el universo estaba lleno de núcleos atómicos (cargados positivamente) y electrones (con carga negativa). Además, había gran cantidad de fotones (partículas de luz) y otras partículas. Este tipo de materia, formado por partículas cargadas interaccionando con fotones, es lo que se denomina *plasma*. Las estrellas actuales, como el Sol, también están hechas de un plasma semejante al que llenaba aquel universo primitivo. La temperatura era tan alta que los electrones no podían ser capturados por los núcleos para formar átomos (exactamente como sucede en las estrellas). En un plasma así, los fotones no podían recorrer mucha distancia sin ser interrumpidos por las partículas cargadas (núcleos atómicos y electrones). Esto se debe a que la luz no es otra cosa que radiación electromagnética, que interacciona fuertemente con las partículas cargadas eléctricamente. Esta idea está simbólicamente representada en la parte izquierda de la siguiente ilustración, donde vemos la trayectoria zigzagueante de un fotón.

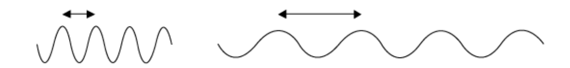


Se trataba por tanto de un universo “traslúcido”, como si una luminosa niebla lo llenara todo (nuevamente como en el interior de una estrella). Sin embargo, a medida que el universo seguía expandiéndose, se fue enfriando progresivamente. Según la teoría, cuando el universo tenía unos 380.000 años, la temperatura había descendido a unos 3.000 ºC. A esa temperatura, los electrones ya eran lo suficientemente lentos para poder ser capturados por los núcleos, dando lugar, por vez primera, a átomos neutros. Aquel acontecimiento trascendental suele denominarse *recombinación*, aunque hubiera sido más correcto llamarlo “combinación”, ya que los electrones no habían estado nunca antes ligados a los núcleos. Fue el nacimiento de los átomos.

A partir de ese instante ya no había partículas cargadas por separado, sino átomos *neutros*. Por ello, los fotones pudieron por fin viajar libremente en línea recta en todas las direcciones sin interrupciones, y lo han seguido haciendo hasta nuestros días. Esto está representado en la parte derecha de la ilustración anterior. Aquellos fotones liberados en

la recombinación constituyen hoy la llamada *radiación de fondo*, que es la que fue detectada por Penzias y Wilson. ¿Les ha pasado algo a aquellos fotones durante estos 14.000 millones de años? Sólo una cosa importante: se han vuelto más fríos, es decir, menos energéticos. ¿Por qué?

Recordemos que el universo se expande y que, según la Teoría de la Relatividad, esta expansión hay que interpretarla como un estiramiento del espacio. Por otro lado, la luz son ondas electromagnéticas, semejantes a las ondas de un estanque, sólo que en ellas lo que oscila no es el nivel del agua, sino campos eléctricos y magnéticos. En el siguiente esquema, la onda de la izquierda representa un fotón (onda electromagnética elemental), inmediatamente después de la recombinación. La distancia entre dos "crestas" de la onda es lo que se llama *longitud de onda*:



La de la derecha representa la misma onda en nuestros días, unos 14.000 millones de años después. El espacio se ha estirado y por tanto la longitud de onda lo ha hecho en la misma proporción. Lo que antes era una radiación luminosa visible (con longitud de onda pequeña), se ha convertido en una radiación de microondas (con longitud de onda mucho mayor). Concretamente, la longitud de onda es ahora mil veces más larga. Sucede que los fotones asociados a longitu-

des de onda más largas son menos energéticos (un resultado de la Mecánica Cuántica). Así que los fotones de la radiación de fondo actual son muy débiles y, en vez de corresponder a una temperatura de 3.000 °C (como cuando fueron liberados), corresponden a una temperatura de 270 °C *bajo cero*. Este tipo de radiación de fondo es lo que predice la teoría y es precisamente lo que se observa.

La radiación de fondo actual es, por tanto, otra reliquia del pasado, que nos da fe de lo sucedido cuando el universo tenía 380.000 años. Las cosas transcurrieron como predice la teoría del Big Bang. Conviene pensar que la radiación de fondo no es algo que está sólo en el espacio exterior, realmente está en todas partes. Ahora mismo usted está siendo alcanzado por millones de aquellos fotones primitivos. Y ésta es la razón por la que Penzias y Wilson la detectaron con una antena en la superficie terrestre.

Desde su descubrimiento, la radiación de fondo se ha estudiado en profundidad, y no ha dejado de dar satisfacciones a la teoría. Por ejemplo, la teoría predice que el espectro de esta radiación (es decir, la cantidad de energía radiante en cada longitud de onda) ha de ser de una forma determinada. Técnicamente, el espectro ha de corresponder a lo que se llama espectro de cuerpo negro perfecto, y eso es precisamente lo que se mide. De hecho, la radiación de fondo supone el ejemplo más perfecto de cuerpo negro que se conoce. Cualquier teoría del universo que quiera competir con el Big Bang debería poder explicar este hecho extraordinario.

En el siguiente capítulo veremos otras informaciones valiosísimas codificadas en la radiación de fondo.

Estructura del universo a gran escala

Antes dijimos que no podemos viajar hacia atrás en el tiempo para ver lo que pasó, pero eso no es del todo cierto. Cuando observamos el universo a distancias gigantescas, no sólo estamos "viajando" en el espacio, sino también en el tiempo, ya que la luz que detectamos fue emitida mucho tiempo atrás. Así, cuando fotografiamos una galaxia situada a cien millones de años luz, lo que vemos en realidad es cómo era la galaxia hace cien millones de años. ¿Y cuál es la imagen más lejana y, por tanto, más antigua, que hemos conseguido fotografiar (con luz visible)? Es el llamado "campo ultraprofundo del *Hubble*", una imagen captada por el telescopio espacial *Hubble* en 2004, después de once días netos de exposición (que en la práctica se realizaron en varios meses). Un fragmento de esa imagen está reproducido en la figura 6.

En ella se pueden observar galaxias tal como eran entre 12.000 y 13.000 millones de años atrás (no todos los objetos están igual de distantes)[6]. En aquella época el Big Bang era un suceso relativamente reciente: sólo habían pasado entre 700 millones y 1.700 millones de años desde la gran explosión; y lo que se observa es que las galaxias de aquella época eran diferentes a las actuales. Tenían un ritmo mayor de producción de estrellas, eran más pequeñas y presentaban

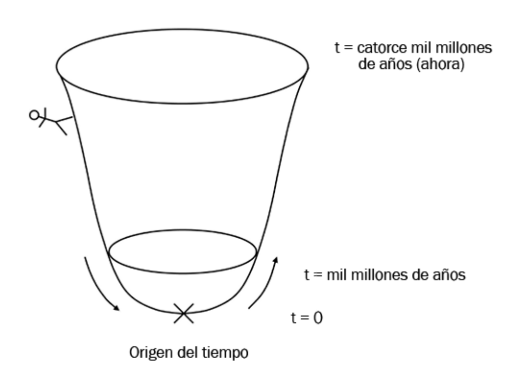
formas más irregulares (algo apreciable a simple vista). Todo esto es consecuencia de que aún eran jóvenes y estaban en proceso de formación. Cuando menos, esta imagen testifica que el universo antiguo era distinto del actual, haciendo insostenible la idea de un universo más o menos estacionario, y dando apoyo por tanto a la teoría del Big Bang.

De forma más genérica, hay que decir que el análisis de la distribución de galaxias a gran escala se está convirtiendo en una herramienta poderosísima para extraer información sobre la estructura del universo, su evolución y su composición, algo sobre lo que volveremos en el siguiente capítulo.

Los límites del espacio y el tiempo

Una pregunta habitual cuando se habla del origen del universo es: ¿qué pasó antes del Big Bang? Es curioso que una cuestión semejante se planteara hace siglos en el ámbito religioso. Los teólogos se preguntaron: ¿qué hacía Dios antes de crear los Cielos y la Tierra? (una buena pregunta). La respuesta que dio san Agustín fue que Dios "preparaba el infierno para los que hacen este tipo de preguntas" (400 d.C.). Aparte de esta broma, san Agustín fue más lejos y afirmó, correctamente, que no tiene sentido preguntar en qué empleaba Dios su tiempo antes de crear el tiempo. De forma semejante, la pregunta ¿qué pasó antes del instante inicial? no tiene mucho sentido. Una analogía de esto nos la da la superficie terrestre. En apariencia, la Tierra es plana, por lo que uno podría caminar de forma indefinida, por

ejemplo en dirección sur. Ahora bien, sabemos que esto no es así: la Tierra es en realidad redonda y por lo tanto hay un punto (el Polo Sur) que es el origen absoluto de la latitud sur. No tiene sentido preguntar: ¿qué hay al sur del Polo Sur? Si, una vez alcanzado el Polo Sur, nos empeñamos en continuar en la misma dirección, lo que haremos será regresar en dirección norte. De forma análoga, podemos imaginar el espacio-tiempo como una especie de enorme dedal, como el de la siguiente ilustración:



En este dibujo el tiempo avanza hacia arriba. Cada sección circular del dedal (es decir, cada anillo) representa el universo en un instante dado. A medida que avanza el tiempo (y, por tanto, subimos por la superficie del dedal), los anillos son cada vez más grandes, como consecuencia de la expansión del universo. El vértice inferior del dedal corresponde al Big Bang: el instante cero, en el que todo el universo observable estaba comprimido en un punto. En esta

imagen, viajar imaginariamente hacia atrás en el tiempo significa deslizarnos hacia abajo por la superficie del dedal. Pero, si una vez alcanzado el instante inicial (Big Bang) pretendemos seguir el viaje en la misma dirección, encontraríamos que regresamos hacia adelante en el tiempo, exactamente como en el Polo Sur de la Tierra. Esto es lo que dice la teoría. Cuesta imaginarlo, pero matemáticamente no hay ningún problema en formularlo. Por tanto, la respuesta a la pregunta de arriba es simplemente que "antes del Big Bang no había nada porque no había un *antes* del Big Bang". ¿Fin de la historia? Podría ser, pero no es seguro.

Para entenderlo, hagamos una pregunta alternativa: ¿es fiable la descripción que la teoría del Big Bang hace del origen del universo *hasta el preciso instante inicial*? Podemos decir que desde una décima de segundo después del Big Bang en adelante, la descripción de la teoría es muy fiable, ya que en ese momento comenzó el proceso de nucleosíntesis primitiva, del que tenemos pruebas experimentales. Para instantes anteriores, hay que recordar que cuanto más reciente era el universo, a mayor temperatura estaba. Por tanto, una descripción fiable de lo que sucedió exige conocer cómo se comporta la materia a altísimas temperaturas. Ésta es una razón esencial (y veremos más a lo largo del libro) por la que la cosmología —la ciencia que estudia el origen del universo— y la física de partículas —la ciencia que estudia los componentes básicos de la materia y sus interacciones— están íntimamente unidas; en realidad, son la misma

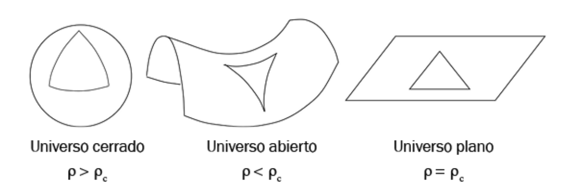
disciplina. La física de partículas proporciona una teoría (el llamado Modelo Estándar, discutido en el capítulo 4), de gran elegancia matemática, que describe con extraordinario éxito el comportamiento de las partículas hasta energías equivalentes a una temperatura de cien billones de grados. Esto corresponde a una cienmilmillonésima de segundo después del Big Bang. En consecuencia, aunque no disponemos de pruebas, podemos remontarnos hasta ese instante con bastantes garantías. De hecho, creemos que en esa época sucedieron acontecimientos importantes. Por ejemplo, pensamos que cuando el universo tenía una diezmilésima de segundo, las partículas elementales llamadas *quarks* se fusionaron, dando lugar a los protones y neutrones. Recordemos que los protones son núcleos de hidrógeno. Ése fue, por tanto, el instante en que se creó el hidrógeno del universo.

Pasando a otras cuestiones, ¿dónde ocurrió el Big Bang? La anterior ilustración del dedal nos sirve para entender que en el instante inicial todo el espacio observable estaba concentrado en un punto. Por tanto, el Big Bang no ocurrió en ninguna posición concreta del universo. En aquel momento todas las posiciones actualmente observables estaban en una sola.

Más cuestiones: ¿el universo es finito o infinito? Sin duda es una pregunta interesante. Y se puede hacer aún más. Hemos dicho anteriormente que, según la Teoría de la Relatividad, el espacio y el tiempo pueden curvarse. Dijimos que, de

hecho, lo hacen cerca de grandes masas, como el Sol. Pero el universo, como un todo, ¿está curvado *globalmente*? Según la ecuación de Einstein anterior, la curvatura global del universo depende de la *densidad* de materia y energía que contenga. Llamemos a esa densidad con la letra griega ρ. Si ρ es grande, el espacio se curva (como cerca de una gran masa) y globalmente el espacio está cerrado, como la superficie bidimensional de una esfera, pero en tres dimensiones. Nuevamente, cuesta imaginárselo (es imposible), pero matemáticamente no hay problema en describirlo. En ese caso, el universo sería finito, pero no tendría límites; igual que la superficie de la esfera. Por el contrario, si ρ es pequeña, el espacio también está curvado pero con curvatura *negativa* (la de la esfera era positiva). Un equivalente en dos dimensiones de curvatura negativa es la superficie de una silla de montar para caballos. Si éste es el caso de nuestro universo, entonces el espacio se extiende infinitamente (igual que podríamos prolongar de forma indefinida la superficie de una silla de montar). Finalmente, hay un caso intermedio: si ρ tiene un valor concreto, denominado *densidad crítica* (ρ_c), entonces el espacio es plano e infinito. El espacio plano es como uno se imagina normalmente el espacio. En la siguiente ilustración están representados, en dos dimensiones, estos tres tipos de espacio. Habitualmente, se denominan espacio (o universo) *cerrado*, *abierto* y *plano*. Hemos trazado un triángulo en cada tipo de superficie. Naturalmente, en el caso plano los ángulos del triángulo suman

180º, como estamos acostumbrados. Sin embargo, en el universo cerrado la suma es mayor de 180º, y en el abierto es menor. Esto nos será de utilidad en el siguiente capítulo.



Y bien, ¿cuál es la densidad ρ de nuestro universo? Aclaremos que la densidad crítica del universo, ρ_c, es realmente una cantidad pequeña: unos 10 miligramos de masa por cada volumen igual al de la Tierra. Esto parece poquísimo, pero es un promedio. En el universo, además de zonas con materia concentrada (como el Sol y los planetas), hay grandes espacios vacíos. Y luego está la contribución de la materia y la energía oscuras. Cuando se tiene en cuenta todo, resulta que la densidad del universo se aproxima mucho a la crítica. Podría ser exactamente la densidad crítica. Por tanto, nuestro universo es *muy* plano: estamos cerca del caso $\rho = \rho_c$ en la ilustración anterior.

Como es habitual en ciencia, cada vez que se responde a una pregunta, surgen preguntas nuevas. En este caso: ¿por qué diablos la densidad del universo es tan parecida a la crítica? Podría haber sido miles de veces mayor o menor. ¿Por qué precisamente $\rho = \rho_c$? Una vez más, tenemos que decir "volveremos sobre ello" (en el capítulo 6).

CAPÍTULO 3
Las huellas del lado oscuro

En el capítulo anterior examinamos las pruebas que tenemos de lo ocurrido en los tiempos de la Gran Explosión, prestando especial atención a la nucleosíntesis primitiva y a la radiación de fondo. En este capítulo vamos a profundizar en éstos y otros testimonios del pasado, para encontrar la marca que la materia y la energía oscuras han dejado en ellos.

Huellas en la nucleosíntesis primitiva

Dijimos en el capítulo 2 que cuando el universo tenía unos 100 segundos se convirtió en un gigantesco horno de fusión nuclear. En un breve lapso de tiempo, parte de los protones (núcleos de hidrógeno) y neutrones iniciales se fusionaron, produciendo ciertas cantidades de helio, deuterio, litio, etc. El cálculo de esta producción de elementos ligeros tiene bastantes sutilezas, en las que no vamos a entrar. Sin embargo, hay que mencionar que en los entresijos del cálculo interviene una magnitud importante: la densidad de *bariones* del universo. En este contexto, los bariones son simplemente los protones y los neutrones. Por tanto, la den-

sidad de bariones es, esencialmente, la densidad de materia ordinaria[7], algo que es posible medir en la actualidad. Cuando se utiliza ese valor medido para los cálculos de la nucleosíntesis primitiva, resultan las abundancias de elementos ligeros citadas en el capítulo 2, que concuerdan exitosamente con las observaciones. Si la cantidad de materia ordinaria hubiera sido mayor o menor, el cálculo hubiera arrojado resultados inconsistentes con las observaciones.

¿Por qué es esto crucial? Recordemos que aún ignoramos la naturaleza de la materia oscura. Podría suponerse (y de hecho se ha sugerido) que es simplemente alguna forma de materia ordinaria que todavía no se ha podido observar directamente; por ejemplo, objetos semejantes a planetas fríos, difíciles de detectar. Sin embargo, el extraordinario acuerdo entre la abundancia de elementos ligeros observada y las predicciones de la nucleosíntesis primitiva nos dice que esta posibilidad es inviable. Si la materia oscura estuviera hecha de materia ordinaria, tendríamos que corregir al alza la densidad de materia ordinaria del universo; y, en consecuencia, los cálculos de la nucleosíntesis primitiva darían predicciones desastrosas. La abundancia de elementos ligeros no sólo nos está dando un testimonio asombroso de lo que ocurrió en los primeros minutos del universo. Nos está diciendo, además, que la materia oscura *no* es materia ordinaria. No nos dice lo que es, pero sí lo que no es.

De forma más cuantitativa, el éxito de los cálculos de la nucleosíntesis primitiva implica que la contribución de los

bariones (materia ordinaria) a la densidad total del universo ha de ser aproximadamente un 4% de la densidad crítica, ρc, que es tanto como decir un 4% de la densidad total del universo, dado que esta última se aproxima mucho a la crítica.

Huellas en la radiación de fondo

Al final del capítulo 1 nos referimos a la escena de la película *El hombre invisible* en la que las huellas dejadas sobre la nieve delataban el paso del misterioso ser. Y decíamos que la materia y la energía oscuras han dejado también una huella detectable en el universo actual. Quizá el ámbito donde esta afirmación resulta más apropiada es la radiación de fondo.

Como veremos enseguida, la radiación de fondo sería la nieve donde podemos percibir ahora mismo las huellas que los componentes invisibles del universo dejaron en ella. En el caso de la película, un observador astuto y meticuloso, al estilo de Sherlock Holmes, podría encontrar en las pisadas mucha información extra. Midiendo la profundidad y la distancia entre las huellas, podría deducir el peso y tamaño del hombre invisible. Si, además, las huellas del pie derecho tuvieran una profundidad distinta que las del izquierdo, podría suponer que el hombre estaba cojo, etc. De un modo muy semejante, los físicos han estudiado la radiación de fondo y han sido capaces de extraer una información asombrosamente rica acerca del universo. Veamos cómo.

Recordemos que la radiación de fondo se produjo justo

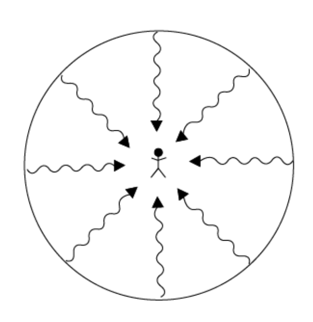
después de la Recombinación (unos 380.000 años después del Big Bang), cuando los fotones se desacoplaron de la materia. Actualmente, la radiación de fondo es una débil radiación de microondas que llena todo el universo, proporcionándole una temperatura de unos 270 °C bajo cero. El cero absoluto de temperaturas es 273 °C bajo cero, por lo que la temperatura *absoluta* de la radiación de fondo es aproximadamente de tres grados o, más exactamente, de 2,728 K (K denota grados "Kelvin", es decir, absolutos). Este número da una idea de la precisión con la que se ha conseguido medir esta "temperatura cósmica". Durante mucho tiempo pareció que ésta era absolutamente homogénea: miráramos hacia donde miráramos la temperatura era la misma, o sea, los fotones nos llegan "igual de calientes" en todas las direcciones. Sin embargo, los físicos sospechaban desde hacía tiempo que eso no podía ser así. Sabemos que el universo no es totalmente homogéneo, pues la materia aparece agrupada en galaxias y cúmulos de galaxias. Si en su origen el universo hubiera sido exactamente homogéneo, estas agrupaciones no se habrían producido, o lo habrían hecho en grado mucho menor.

Por fin, en 1992, los datos del satélite *COBE* pusieron de manifiesto las esperadas inhomogeneidades de la radiación de fondo (los investigadores principales de la colaboración, George Smoot y John Mather, recibieron por ello el Premio Nobel en 2006). Esas inhomogeneidades o fluctuaciones de la temperatura de un punto a otro son extraordinariamente

tenues: del orden de unas cienmilésimas de grado, que es precisamente lo que se esperaba.

Posteriormente, el satélite norteamericano *WMAP* (a partir de 2003) y, más recientemente, el europeo *PLANCK* (a partir de 2010) han sido capaces de cartografiar con extraordinaria precisión las inhomogeneidades de la temperatura de la radiación de fondo. El resultado es el mapa del cielo de la figura 7. Esta imagen se ha hecho famosa (con razón) y es habitual encontrársela en miles de publicaciones y páginas web. Es importante entender bien su significado. Cada punto del mapa corresponde a una dirección por la que, procedentes del cielo lejano, nos llegan a la Tierra fotones de la radiación de fondo. Los colores representan la temperatura asociada a esos fotones (azul, frío; rojo, caliente). Repetimos que, en realidad, las variaciones de temperatura de un punto a otro del mapa son sólo de cienmilésimas de grado.

Notemos que los fotones de la radiación de fondo que alcanzan la Tierra *justo ahora* partieron (hace 14.000 millones de años) de una imaginaria superficie esférica muy lejana, en cuyo centro estamos nosotros, tal como ilustra el siguiente dibujo:



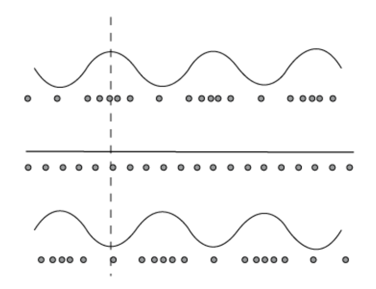
Debido a la expansión cósmica, la distancia actual entre esa esfera y nosotros es de unos 46.000 millones de años luz. Por tanto, el mapa en cuestión representa realmente las variaciones de temperatura en la superficie de esa imaginaria esfera gigante. Para representar una esfera sobre un papel, es frecuente imaginar que se le ha hecho una raja (de "Polo Norte" a "Polo Sur") y se ha abierto y aplastado sobre el papel; es lo que se hace a menudo para realizar un mapa de la Tierra. Cuando se hace eso mismo con esa lejana esfera, lo que resulta es la famosa imagen de la figura 7. Sigamos profundizando en su significado. Recordemos que el universo primitivo, previo a la Recombinación, estaba lleno de plasma: una sopa de partículas cargadas (núcleos positivos y electrones negativos) y fotones, en intensa interacción unos con otros. Las zonas del universo a mayor temperatura eran aquellas donde el plasma estaba más concentrado, más denso. Por tanto, el famoso mapa de temperaturas de la figura 7 es también un *mapa de densidades* de aquel plasma primitivo en el momento de la Recombinación.

A partir de ese instante, como sabemos, la materia se

condensó en forma de átomos neutros y los fotones se desentendieron de ella. Por tanto, aunque las variaciones de densidad de la materia han seguido evolucionando (y enormemente) desde entonces, la "foto" de la radiación de fondo no ha cambiado esencialmente, y nos muestra cómo era el universo en la época de la Recombinación. Así que, cuando dijimos que la imagen captada por el telescopio *Hubble* (campo ultraprofundo de la figura 6) era la más antigua que poseemos del universo, en realidad no era cierto… El mapa de la radiación de fondo de la figura 7 nos da una imagen del cosmos aún más antigua: cuando sólo tenía 380.000 años.

Consideremos ahora lo siguiente. Esas ligeras fluctuaciones de temperatura y densidad "fotografiadas" son, en realidad, algo bastante ordinario: ondas sonoras en el plasma primitivo. Las ondas sonoras cotidianas son, de hecho, perturbaciones minúsculas de densidad y presión que se propagan en el aire. Si hiciéramos un mapa de la densidad del aire en una habitación llena de ruido, veríamos fluctuaciones parecidas a las observadas en la radiación de fondo. Sigamos con esta analogía. Supongamos ahora que el aire de la habitación está lleno de un solo sonido puro (por ejemplo, una nota musical), con una longitud de onda determinada. Recordemos que la longitud de onda es la distancia entre dos crestas de una onda: en este caso, entre dos puntos con máxima densidad del aire. El siguiente esquema muestra la disposición de las moléculas de aire a lo largo de una misma lí-

nea en tres instantes diferentes. La línea ondulada representa la densidad en cada punto. Vemos que las zonas de máxima densidad (crestas de la línea ondulada) van alternando con las de mínima densidad (valles), tanto espacialmente (a lo largo de la línea) como temporalmente (para un mismo punto, en momentos sucesivos). La onda representada es lo que se llama una onda estacionaria, como las que se forman en una cuerda de guitarra o en el interior de una flauta. Lo que caracteriza a una onda estacionaria es que no "se desplaza", sólo oscila. Éste es el tipo de ondas que había en el universo primitivo.



Notemos que el contraste (diferencia) de densidad entre dos regiones vecinas varía con el tiempo. De hecho, como se aprecia en el esquema anterior, hay un estado intermedio de la onda en el que no hay contraste en absoluto (la densidad es uniforme). Por el contrario, el máximo contraste de densidad se obtiene cuando la onda pasa por sus dos estados extremos: los que producen máximas compresiones y expansiones, como se aprecia también en dicho esquema. Ad-

virtamos que, en ese caso, los puntos con mayor diferencia de densidad entre ellos están separados por una distancia de media longitud de onda (la distancia entre una cresta y un valle).

Si el universo primitivo hubiera estado lleno de un único sonido puro, con una longitud de onda concreta, el mapa de la radiación de fondo de la figura 7 sería mucho más regular, parecido a un tablero de ajedrez de casillas rojas y azules, separadas por media longitud de onda. No es así, porque en realidad había sonidos de muy distintas longitudes de onda, superpuestos unos con otros. Y, además, en el momento de la "foto" no todos estaban experimentando máxima compresión o expansión, como pronto quedará claro.

Pensemos en un instrumento musical, por ejemplo una flauta, que emite la nota *do*. Cuando se analiza el sonido que produce, se comprueba que tampoco es puro. Consiste en un tono dominante o *fundamental* (correspondiente a la nota *do* pura) y muchos tonos (llamados armónicos) que acompañan al primero. Precisamente, esos armónicos son los que revisten al tono fundamental de una manera que es diferente para cada instrumento y que le da su personalidad. Los armónicos de una flauta son distintos a los de un piano. Si no hubiera armónicos, todos los instrumentos sonarían igual (de forma parecida a un diapasón). Un especialista podría incluso plantearse el siguiente problema: a partir de un sonido musical, o sea, del tono fundamental y sus armónicos, intentar *reconstruir teóricamente* la forma y ma-

terial de construcción del instrumento que lo produjo. Ese especialista intentaría deducir cosas como la longitud y el grosor de la flauta, si se trataba de una flauta de madera o de metal, etc. Esta tarea no es realmente tan absurda. Es en parte lo que hacen los expertos para diseñar un instrumento excelente, que imite, por ejemplo, el sonido de un violín Stradivarius. Nuestro problema es parecido. Conocemos el sonido del universo primitivo: es el que está "fotografiado" en el mapa de la radiación de fondo; y queremos conocer las características (forma y "material de construcción") del instrumento que lo produjo: el propio universo.

Cuando se descompone el mapa "sonoro" de la radiación de fondo en ondas puras, lo primero que se encuentra es que, al igual que en la flauta, existe una onda con más peso que las demás y que podemos llamar *tono fundamental.* Su longitud de onda (después de haber sido amplificada unas mil veces por efecto de la expansión cósmica) ocupa en el cielo un ángulo de aproximadamente un grado. Esto se puede apreciar a simple vista en la figura 7. Mirando la figura con atención, y recordando que representa una esfera, se percibe que, efectivamente, hay un "granulado básico": una distancia típica del orden de un grado, en la que es más frecuente que un punto caliente pase a frío y viceversa.

Maticemos que una cosa es el tamaño real de las cosas y otra su tamaño aparente, que depende de la distancia a la que las observamos. El Sol tiene un diámetro 400 veces más grande que la Luna, pero su tamaño aparente en el cielo es

el mismo, ya que el Sol está 400 veces más lejos. En otras palabras, el ángulo visual (con vértice en nuestro ojo) que ocupa el Sol es el mismo que el que ocupa la Luna: aproximadamente medio grado; curiosamente, un tamaño parecido al del granulado en el mapa de la radiación de fondo. Pero la esfera representada por dicho mapa está colosalmente más lejos que el Sol: a 46.000 millones de años luz. Por ello, el tamaño "en metros" de esa longitud de onda fundamental es enorme: unos mil millones de años luz. Sin embargo, éste es el tamaño que tiene ahora, después de haber sido estirada mil veces por la expansión del universo. En la época de la Recombinación (el momento de la "foto") la longitud de onda era aproximadamente de un millón de años luz (por cierto, totalmente inaudible para nuestros oídos). ¿Por qué el tono fundamental tenía precisamente esa longitud de onda?

Para entenderlo pensemos en una pequeña región del plasma primitivo. Por efecto de las ondas sonoras, ese pedazo de plasma se contraía y se expandía como una pelota de goma o un muelle que se comprime y se estira. Ahora bien, cada onda que vibraba en el plasma primitivo tenía una longitud de onda y un periodo de oscilación distinto (a mayor longitud de onda, mayor periodo de oscilación). Entonces, aunque existieran ondas de todos los tipos, las que produjeron un mayor contraste de densidad en el instante de la Recombinación fueron las que *en ese momento* estaban provocando una compresión o una expansión máxima en el fragmento de plasma. Vamos a ver cuáles eran.

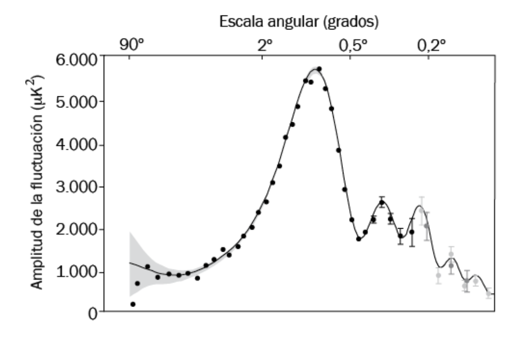
Supongamos que *inicialmente* nuestra región de plasma tenía una densidad ligeramente mayor que su entorno. Entonces, lo primero que experimentó fue una compresión debida a la pura atracción gravitatoria. Éste fue el comienzo de las ondas sonoras, como cuando se da una palmada y se produce un sonido. Así que, a nuestro pedazo de plasma, todas las ondas sonoras empezaron produciéndole una compresión. Después lo expandieron y luego lo volvieron a comprimir, etc.; pero cada una lo hizo con un periodo distinto. La onda fundamental fue, precisamente, la que después de los primeros 380.000 años (desde el inicio del universo hasta el momento de la Recombinación) había tenido el tiempo justo de producir una primera compresión máxima del plasma, es decir, media oscilación completa. Por tanto, conocemos su periodo y de ahí podemos deducir su longitud de onda[8], que resulta ser aproximadamente… un millón de años luz, en perfecto acuerdo con lo observado. Ésta es, pues, la razón por la que el tono fundamental de la radiación de fondo tiene la longitud de onda que tiene, lo que supone una verificación sensacional de la teoría del Big Bang.

Hay que recalcar que, en realidad, no es que el universo contuviera más cantidad de esa onda fundamental que de otras. La cuestión es que en el momento de la Recombinación esa onda era "la que más se notaba", porque estaba en la fase de producir una máxima compresión. Si la "foto" del universo se hubiera podido tomar 200.000 años antes, ha-

bríamos visto otro tono fundamental.

Luego todo funciona correctamente: el tono fundamental de la radiación de fondo nos confirma cuál era la edad del universo en la época de la Recombinación. Pero es lógico esperar que, además del tono fundamental, existieran armónicos. Una onda de oscilación más rápida, cuyo periodo fuese la mitad del fundamental (y, por tanto, su longitud de onda también la mitad), habría tenido el tiempo justo de realizar una oscilación completa: bajo su influencia nuestro pedazo de plasma habría tenido el tiempo justo de comprimirse y luego expandirse de forma máxima. En consecuencia, esa onda también produciría un contraste máximo de densidades en el momento de la Recombinación. Y así podríamos seguir: una onda cuyo periodo y longitud de onda fueran un tercio de los de la fundamental habría tenido el tiempo justo de producir una compresión, una expansión y una nueva compresión, etc. Por ello, al analizar el mapa de la radiación de fondo, uno debería esperar tonos armónicos con longitudes de onda: 1/2, 1/3, 1/4… de la fundamental. ¡Y esto es precisamente lo que se observa! El siguiente gráfico representa el contenido de cada longitud de onda en el mapa de la radiación de fondo, lo que podemos llamar su "espectro sonoro". Es el equivalente a la descomposición del sonido de una flauta en el tono fundamental y sus armónicos. En el gráfico vemos un primer pico, correspondiente a la longitud de onda fundamental, y otros picos (los armónicos). El eje horizontal está en grados, ya que estamos midiendo las longitu-

des de onda por sus tamaños aparentes: los ángulos visuales que ocupan en el cielo.



Además de confirmar las expectativas teóricas de forma impresionante, en este gráfico hay una gran cantidad de información extra, como vamos a ver. El cálculo teórico de las alturas de los diversos picos encierra muchas sutilezas en las que no podemos entrar. Nos conformaremos con mencionar algunos efectos importantes que afectan a las mismas.

El primer pico del espectro sonoro corresponde a la amplitud de la onda fundamental y, por tanto, tiene que ver con la magnitud de la compresión inicial. Como hemos dicho, esa compresión fue principalmente de tipo gravitatorio y, por tanto, está relacionada (en una forma complicada y parcialmente enmascarada por otros efectos) con la densidad de la materia. Por ello, la altura de ese primer pico contiene información directa acerca de la densidad *total* de materia (ordinaria y oscura) del universo. Y lo que se deduce

de ella es que esa densidad es aproximadamente un 27% de la densidad crítica. Esto es precisamente lo que uno se esperaría. Recordemos que la materia ordinaria representa un 4% (aproximadamente) de la crítica, como sabemos a partir de su observación directa y del análisis de la nucleosíntesis primitiva, y que, por otro lado, las observaciones astronómicas indican que la materia oscura representa un 23% (aproximadamente) de la densidad crítica. Sumadas, la densidad total de materia en el universo debería de ser, aproximadamente, un 27% de la crítica; ¡justo lo que nos confirma el primer pico del espectro sonoro de la radiación de fondo!

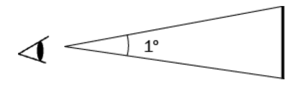
Vayamos ahora con el segundo pico. Recordemos que corresponde a una onda que en el momento de la Recombinación producía máxima expansión en nuestro trozo de plasma. Por tanto, su altura tiene que ver con la magnitud de esa expansión. Pensemos por un momento: ¿qué fuerza produce esa expansión del plasma? Simplemente la presión del mismo. Al igual que la presión del aire en las ondas sonoras ordinarias, la presión del plasma tiende siempre a restablecer el equilibrio de densidad y temperatura. Por ello, después de una compresión produce una expansión, como un muelle que, tras ser comprimido, se expande. Sin embargo, ahora la gravedad juega a la contra: a la materia del plasma le cuesta más expandirse que contraerse, porque la fuerza gravitatoria tiende siempre a comprimirla. En un imaginario mundo sin gravedad, las compresiones y las expansiones serían igualmente importantes. Pero en el mundo real con

gravedad, la expansión de nuestro pedazo de plasma será menos acentuada de lo que fue su compresión. Esto explica por qué la altura del segundo pico del espectro sonoro es más baja que la del primero. Además, pensemos en lo siguiente. En un plasma, la presión es debida sobre todo a los fotones que están en él, y que están interaccionando con las partículas cargadas. Esto significa que la materia oscura *no siente* esa presión, ya que no interacciona con los fotones. Por tanto, *sólo la materia ordinaria* (la que forma el plasma propiamente dicho) *se expande.* En consecuencia, la altura del segundo pico está relacionada con la cantidad de materia ordinaria del universo; y lo que se deduce de esa altura es que la materia ordinaria es aproximadamente un 4% de la densidad crítica. ¡Justo lo que se preveía! Además, deducimos que la materia oscura no puede ser materia ordinaria, ni estar compuesta por partículas con carga eléctrica. Si fuera así, habría formado parte del plasma inicial y la altura del segundo pico sería distinta. La materia oscura ha de ser necesariamente "otra cosa".

Lo que hemos dicho para el segundo pico se puede aplicar a todos los picos del espectro sonoro que ocupan posiciones pares —asociados a expansiones máximas del plasma —. Como se observa en el gráfico anterior, tienden a ser más bajos que los picos en posiciones impares —asociados a compresiones máximas—. También hay un efecto disipativo de las ondas sonoras, que hace que los picos sean cada vez más bajos.

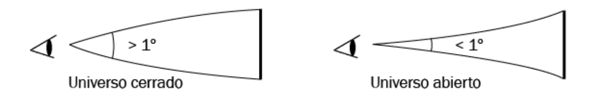
Todo esto supone unos éxitos extraordinarios que se han obtenido en los últimos años al analizar el mapa de la radiación de fondo. Los astrofísicos y cosmólogos han analizado —y siguen analizando— este mapa como Sherlock Holmes hubiera analizado las pisadas sobre la nieve. Recapitulemos: la altura de los picos del espectro sonoro es semejante a la profundidad de las pisadas. Que los picos en posiciones impares sean más altos que los de las posiciones pares asemeja a una cojera del hombre invisible. Del estudio de estas "pisadas" se ha podido inferir la cantidad de materia ordinaria y materia oscura del universo, además de deducir que la naturaleza de la materia oscura es necesariamente distinta que la de la ordinaria.

Y aún podemos extraer más información. Hemos dicho que la longitud de onda del tono fundamental subtiende en el cielo un ángulo aproximadamente de un grado. Esto está simbolizado en esta imagen:



Ahora bien, al dibujar este triángulo estamos dando por sentado que el universo tiene geometría plana. Como vimos en el capítulo anterior, en un universo cerrado o abierto la suma de los ángulos de un triángulo sería, respectivamente, mayor o menor que 180°, por lo que la imagen anterior ten-

dría este aspecto:



Por consiguiente, el ángulo visual aparente que ocuparía la longitud de onda fundamental en estos casos sería, respectivamente, mayor o menor que en el caso plano. Pero resulta que el ángulo medido concuerda perfectamente con el caso plano. De ahí deducimos que nuestro espacio es necesariamente muy plano y por tanto muy grande (quizá infinito, aunque esto no es seguro). Al igual que nuestro detective podía deducir el tamaño del hombre invisible a partir de la distancia entre sus huellas, aquí deducimos la forma (plana) y tamaño (muy grande) del universo por el tamaño aparente de las longitudes de onda en el cielo (posiciones de los picos en el espectro sonoro).

Por otro lado, si el universo es muy plano, la densidad total de materia y energía ha de ser muy próxima a la crítica (véase el capítulo anterior). Sin embargo, sabemos que la suma de materia ordinaria y oscura representa sólo el 27% de la densidad crítica. Por ello, hace falta algún componente extra en el universo, que no sea ni materia oscura ni ordinaria, sino algo diferente. Y ese "algo" es precisamente la energía oscura, que discutiremos más a fondo en el capítulo 5. Repetimos esta idea esencial: la radiación de fondo nos dice

que la densidad del universo es muy próxima a la crítica, un hecho que hasta ahora habíamos manejado sin explicar su fundamento. De ahí deducimos que ha de existir un ingrediente extra en el universo, responsable de un 73%, aproximadamente, de su densidad total. Pero nos da pocas pistas sobre la naturaleza de este misterioso ingrediente.

Como hemos visto, la cantidad de información codificada en la radiación de fondo es sorprendentemente abundante. De hecho, hay información adicional que no hemos discutido (por ejemplo, la relacionada con la polarización de esa radiación). Actualmente, la comunidad científica está realizando un gran esfuerzo para descifrar toda la información contenida en este auténtico tesoro del pasado remoto, por lo que podemos esperar noticias interesantes en los próximos años.

Para terminar esta larga sección, comentemos un poco la historia de estos hallazgos. La estructura de picos del espectro sonoro de la radiación de fondo fue anticipada por Sakharov, Peebels y Yu, y Sunyaev y Zeldovich en los años sesenta, mucho antes de que se observara experimentalmente (lo que sucedió a partir de los años noventa). Esto da mucha más fuerza a los hallazgos: no es que se haya detectado el espectro sonoro de la radiación de fondo y posteriormente se haya interpretado de la forma que hemos expuesto; los físicos habían predicho que debía tener precisamente esa estructura, lo que resulta mucho más impresionante. Por otro lado, los primeros atisbos de la energía os-

cura no provinieron del estudio de la radiación de fondo, sino, como veremos, del estudio de las supernovas lejanas (a partir de 1998). A pesar de que en años anteriores la radiación de fondo parecía ya indicar que la densidad total de energía era cercana a la crítica, esto no se tomó inicialmente como una indicación de que el universo tenía un ingrediente extra. La razón es que los datos de la radiación de fondo (e incluso los astronómicos) eran aún poco precisos, y muchos físicos creyeron que sólo con materia oscura y ordinaria se podía alcanzar el valor de la densidad crítica, lo que hoy sería insostenible.

Huellas en la estructura a gran escala

El estudio de la estructura del universo a gran escala, es decir, la distribución espacial de las galaxias y otras formas de materia, está adquiriendo cada vez más importancia para comprender las claves del universo. Igual que la radiación de fondo muestra una estructura peculiar de fluctuaciones espaciales, reproducida en la figura 7, la distribución de las galaxias tampoco es homogénea. La figura 8 muestra un mapa parcial de esa distribución en una zona de nuestro universo. Cada punto representa una galaxia (hay pintadas más de 200.000). Los dos sectores del mapa corresponden a las zonas en las que se ha realizado la exploración. Son como dos trozos de pizza gigantes con vértice en nuestra galaxia.

Aunque la distribución de galaxias pueda parecer más o

menos homogénea, en realidad no lo es. En primer lugar, se ve que en zonas más lejanas parece haber menor densidad de galaxias. Sin embargo, no se trata de un efecto real, sólo es una consecuencia de nuestro imperfecto sistema de observación. Simplemente sucede que las galaxias más lejanas se ven más tenues y, como el instrumento de observación empleado tiene una sensibilidad limitada, hay galaxias lejanas que no se detectan. Pero aparte de este efecto, al observar la figura 8 con atención, se nota que hay zonas con mayor aglomeración de galaxias (más luminosas) y zonas más vacías (más oscuras). Esto no es una novedad, sabemos empíricamente desde hace décadas que las galaxias se presentan agrupadas en cúmulos de diversos tamaños.

Sobre un mapa así se puede hacer un estudio parecido al que se hizo con la radiación de fondo, examinando la "longitud de onda fundamental" de la distribución, los tonos secundarios, etc. Sin embargo, para las galaxias todo es más complicado. La "foto" que vemos ahora mismo de su distribución espacial es el resultado de la *evolución* de aquellas tenues inhomogeneidades primitivas que fueron registradas en la radiación de fondo. Dicha evolución está causada por la fuerza gravitatoria producida por las distintas especies de materia y energía presentes en el universo, y es difícil de calcular. Sólo se puede hacer de forma fiable con la ayuda de superordenadores. Pero como se ha avanzado mucho en ese terreno, se pueden sacar conclusiones muy robustas comparando la evolución teórica de las inhomogeneidades

primitivas hasta nuestros días con lo que realmente observamos.

Pensemos, de forma cualitativa, cómo se ha generado la distribución de galaxias que ahora contemplamos. Hasta la época de la Recombinación, la materia ordinaria (la que forma las galaxias) estaba en forma de plasma y había estado vibrando por efecto de las ondas sonoras que hemos discutido. Esas ondas producían ligerísimas fluctuaciones en la densidad del plasma. Pero mientras la materia ordinaria (el plasma) vibraba, la materia oscura ya iba agrupándose cada vez más por efecto de la fuerza gravitatoria. Recordemos que la materia oscura no interaccionaba con los fotones del plasma y, por tanto, no vibraba ni sentía ninguna fuerza que la impidiera seguir colapsándose desde el primer momento. Cuando llegó la Recombinación, la materia ordinaria también se desentendió de los fotones y comenzó su proceso de agrupación gravitatoria.

Por cierto que una historia semejante tendrá lugar en nuestro Sol. Actualmente, el Sol no colapsa por su propio peso gracias a la presión ejercida por los fotones del plasma solar, que se opone a la compresión gravitatoria. Cuando el Sol se apague (dentro de bastantes miles de millones de años) sí colapsará y formará una pequeña "enana blanca". Pero si, además de materia ordinaria, el Sol contiene materia oscura (lo que es perfectamente posible), ésta no siente ningún impedimento para comprimirse gravitatoriamente, y *ya* habrá colapsado en el centro del Sol. Existe, por tanto,

una posibilidad de que el centro del Sol contenga una cantidad apreciable de materia oscura concentrada.

Desde la época de la Recombinación los dos tipos de materia (ordinaria y oscura) han seguido su curso de agrupación gravitatoria. Lo que indica la teoría es que si no hubiera materia oscura, el proceso de agrupamiento gravitatorio habría sido menos eficaz: habría tardado mucho más en empezar a generar galaxias y no se habrían llegado a crear los cúmulos de galaxias actuales. Las galaxias estarían mucho menos "hacinadas" en cúmulos. Por tanto, hace falta mucha más materia que la visible, precisamente en una proporción que concuerda con la esperada (un 23% de la densidad crítica). Así que la distribución actual de las galaxias nos da una importante prueba adicional de la existencia y abundancia de la materia oscura. Pero, además, nos dice algo extra acerca de su naturaleza.

Supongamos por un momento que la materia oscura estuviera formada por partículas que se mueven a gran velocidad, tanta que su energía cinética (la energía asociada a la velocidad) fuera mayor que la energía contenida en su propia masa. Una materia así se denomina "materia oscura caliente" en la jerga de los físicos. Pues bien, la materia oscura caliente es ineficaz para producir el agrupamiento de galaxias que observamos. La razón es que la velocidad de las partículas que la forman sería tan grande que éstas escaparían a los efectos gravitatorios y no se acumularían. Por tanto, necesitamos "materia oscura fría" que desde el princi-

pio pueda agruparse por su propia gravedad. Esta importante característica permite descartar muchos candidatos a materia oscura.

Cuando se simula en un superordenador la evolución de la materia (asumiendo que la materia oscura es fría) a lo largo de 14.000 millones de años, se obtienen distribuciones finales que concuerdan muy bien con lo que realmente observamos. En la figura 9 vemos el resultado de una simulación de ese tipo para un fragmento del universo (la longitud del rectángulo es de unos 1.700 millones de años luz). La materia oscura aparece agrupada de forma "filamentosa", como un amasijo de telarañas. En las zonas de más alta densidad (representadas como más luminosas) estarían insertadas las galaxias y cúmulos de galaxias. Ésta es la forma típica en la que creemos que la materia (ordinaria y oscura) está distribuida en el universo.

Además de información valiosísima acerca del carácter de la materia oscura, la distribución de galaxias guarda otros secretos. Recientemente se ha podido demostrar de manera convincente que la longitud de onda fundamental que apreciábamos en la radiación de fondo está también presente de forma prominente en la distribución de galaxias. En otras palabras, es mucho más fácil encontrar acumulaciones de galaxias separadas por esa distancia fundamental (convenientemente amplificada por efecto de la expansión del universo) que por distancias algo más grandes o más pequeñas. Esto es una huella inequívoca de que las galaxias y su distri-

bución en el universo son realmente el resultado de la evolución de aquellas tenues fluctuaciones de densidad primitivas. Como veremos en el capítulo 5, el estudio de esta longitud característica en la distribución de las galaxias puede arrojar luz sobre la naturaleza de la energía oscura.

CAPÍTULO 4

Búsqueda y captura de la materia oscura

Se buscan candidatos

Cuando la policía investiga un crimen, utiliza las pistas dejadas por el criminal para identificar posibles sospechosos y luego intenta capturarlos. En nuestro caso, hemos visto, en multitud de ámbitos distintos, las huellas inequívocas de la materia oscura. Pero ¿qué candidatos tenemos para la misma y qué esfuerzos se están haciendo para detectarlos?

La materia oscura ha dejado algunas pistas de su identidad, aunque no demasiadas. Conocemos su abundancia aproximada (un 23% de la densidad crítica). Esto es importante, ya que una explicación plenamente satisfactoria de la materia oscura no consiste sólo en decir “la materia oscura es esto”; hace falta explicar también por qué tiene la abundancia que tiene, del mismo modo que sabemos explicar las abundancias de los elementos ligeros a partir de la nucleosíntesis primitiva. Un candidato a materia oscura que se produzca con demasiada (o demasiado poca) abundancia en el universo primitivo es un candidato problemático o, incluso, descartable. Por tanto, la sola abundancia de la materia oscura es una pista crucial para identificar candidatos razo-

nables a la misma. Además, la materia oscura tiene que ser estable; no puede estar hecha de partículas que se desintegren, como los neutrones (que lo hacen al cabo de unos minutos). Las partículas de materia oscura han de tener una vida de al menos 14.000 millones de años: desde el universo primitivo (en el que ya estaba presente) hasta nuestros días. Por otro lado, sabemos (por la distribución de galaxias) que la materia oscura ha de ser fría (no demasiado rápida). Y lo más importante: las interacciones de la materia oscura con la ordinaria (y seguramente con ella misma) han de ser muy débiles.

Respecto a los candidatos a materia oscura, en los últimos años se han hecho muchas propuestas. Ésta es una lista (parcial) de ellos: neutralinos, gravitinos, axiones, moduli, modulinos, modos de Kaluza-Klein, dobletes inertes, wimpzillas… Incluso sin entrar en el significado de estos extraños nombres, podemos sacar una primera conclusión: los físicos tenemos muy poca idea de lo que es la materia oscura. Si hay tantas propuestas es que ninguna es muy convincente. Sin embargo, algunas de ellas son realmente muy interesantes, pero para entenderlas debemos comprender antes el contexto en el que han surgido; y para ello hay que repasar primero lo que actualmente *sí* sabemos acerca de las partículas elementales. Ese conocimiento está sistematizado en una teoría de gran éxito, llamada por los físicos el *Modelo Estándar.*

El Modelo Estándar

El Modelo Estándar de la física de partículas tiene dos ingredientes básicos: los *componentes de la materia* —las partículas elementales de las que están hechas las cosas— y las *interacciones* —los distintos tipos de fuerzas básicas que ejercen unas partículas sobre otras—. Comencemos por los primeros. Hemos dicho que la materia ordinaria está hecha de protones, neutrones y electrones, que son los constituyentes de los átomos. Efectivamente, estas partículas suponen la casi totalidad de la materia visible del universo. Sin embargo, hay que hacer dos precisiones. Primero, el protón y el neutrón no son partículas elementales, sino que están hechos de otras partículas, llamadas *quarks*. En este nivel hay dos tipos de quarks: el quark *u* y el quark *d* (iniciales de *up*, *down* en inglés). El protón está hecho de tres quarks en la combinación *uud*. La composición del neutrón es *udd*. Los quarks son partículas tan elementales como pueda serlo el electrón, es decir (por lo que sabemos), totalmente elementales, aunque no se pueden descartar futuras sorpresas. Los quarks se caracterizan porque sienten la llamada fuerza fuerte: una interacción parecida a la electromagnética, pero de mayor intensidad y que es la que los mantiene unidos en el interior de un protón o un neutrón.

Dado que casi toda la materia ordinaria, incluidos nosotros mismos, está hecha de átomos, resulta que en su mayor parte está hecha con sólo tres partículas elementales: los quarks *u* y *d* (que forman los protones y neutrones) y el electrón. Los planetas, las estrellas, el polvo y el gas que flo-

ta en el espacio exterior, todos están hechos sólo con estas tres piezas básicas. Pero hay algo más. En las desintegraciones de los neutrones se produce otro tipo de partículas, llamadas *neutrinos* (representados por la letra griega ν). Los neutrinos son partículas extraordinariamente ligeras (mucho más que el electrón) y sin carga eléctrica. Esto las hace muy difíciles de detectar, pero realmente están ahí, y en cantidades asombrosas. De hecho, hasta donde sabemos, es la partícula de materia más abundante (en número) del universo. Por ejemplo, a cada segundo usted está siendo atravesado por billones de neutrinos (la mayor parte provenientes del Sol y otros muchos procedentes de los primeros instantes después del Big Bang).

El electrón (*e*), el neutrino (ν) y los quarks *u* y *d* forman lo que se llama la primera familia de partículas elementales (o familia del electrón):

$$\begin{matrix} \nu_e & u \\ e & d \end{matrix}$$

Hemos puesto un subíndice "*e*" al neutrino para indicar que en sus interacciones aparece siempre asociado al electrón.

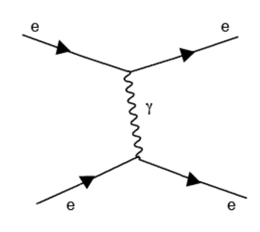
Pero aquí no acaba la historia. Existen otras dos familias de partículas elementales, totalmente análogas a la primera: la familia del *muón* (μ) y la del *tau* (τ). El muón y el tau son

prácticamente idénticos al electrón en todo (por ejemplo, en su carga eléctrica), sólo que tienen más masa (el muón es unas 200 veces más pesado que el electrón, y el tau, unas 3.500). Y, al igual que el electrón, cada uno tiene su familia completa, formada por un neutrino (νμ y ντ,, respectivamente) y una pareja de quarks (*c, s* para el muón, y *t, b* para el tau). Por lo que sabemos, *no* hay más familias de partículas elementales. Mejor dicho, si las hubiera deberían ser muy distintas a las conocidas. Así que entre las tres familias tenemos un total de 12 partículas de materia verdaderamente elementales. ¿Por qué la materia ordinaria (la única observada directamente) se presenta en tres familias de partículas con esta organización tan peculiar? Nadie lo sabe; y, naturalmente, ésta es una cuestión palpitante de la física de partículas actual.

Hablemos ahora de las interacciones de la materia. Hemos mencionado la interacción *electromagnética*, que es sentida por todas las partículas elementales con carga eléctrica, es decir, todas, excepto los neutrinos. Por otro lado está la interacción *fuerte*, sentida sólo por los quarks. Y la llamada interacción *débil* (que juega un papel esencial en los procesos de nucleosíntesis, tanto en el universo primitivo como en el interior de las estrellas). La fuerza débil se siente por las 12 partículas elementales conocidas. A estas tres interacciones hay que añadir la *gravitatoria*, sentida también por todas las partículas. La intensidad de la fuerza gravitatoria es mucho menor que la de cualquiera de las otras tres

(incluyendo la débil). Sin embargo, para objetos grandes como la Tierra, las fuerzas gravitatorias, provenientes del gran número de átomos presentes, se acumulan y se hacen apreciables, como bien sabemos.

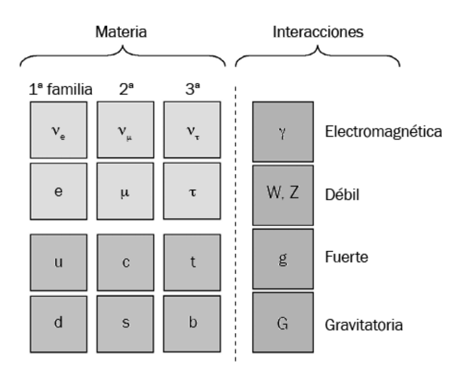
Las cuatro interacciones básicas están mediadas por ciertas partículas, que hacen el papel de mensajeros de la interacción. Por ejemplo, los fotones son los mediadores de la interacción electromagnética. Cuando un electrón (de carga negativa) repele a otro electrón, podemos imaginarnos que esa repulsión surge del intercambio de fotones entre ellos. Esto podemos visualizarlo así:



La letra griega γ simboliza el fotón intercambiado. De un modo semejante, la interacción fuerte está mediada por los llamados *gluones* (g), y la interacción débil por los llamados *bosones W* y *Z*. Finalmente, todos los físicos creen que la interacción gravitatoria tiene también su partícula mediadora, el *gravitón* (*G*), que es la única de estas partículas que aún no se ha detectado como tal.

Resumiendo todo lo que hemos dicho, podemos dar una tabla de todas las partículas elementales *conocidas* y las par-

tículas que median sus interacciones:



Dado que los átomos están hechos de partículas de la primera familia, podemos preguntarnos: ¿por qué en el universo hay tantas partículas de la primera familia y tan pocas de las otras dos? La razón es sencilla: con excepción de los neutrinos, la materia de la segunda y tercera familia es inestable. Por ejemplo, un muón se desintegra en una millonésima de segundo, produciendo un electrón, un neutrino electrónico y un neutrino muónico. Asimismo, los quarks de la segunda y tercera familia forman multitud de partículas compuestas, pero todas ellas son inestables. En realidad, también los quarks de la primera familia (en combinación o no con los de las otras dos) forman muchas partículas compuestas, no sólo el protón y el neutrón. Pero sólo el protón es estable. El neutrón no lo es cuando está aislado, aunque puede "vivir" indefinidamente dentro de un núcleo atómico. Así que la segunda y tercera familia están ahí (y nadie sabe por qué), pero desde luego no sirven para formar materia

oscura: ésta sería muy inestable y no habría perdurado en el universo (salvo los neutrinos). Además, todas las partículas elementales (nuevamente salvo los neutrinos) tienen carga eléctrica, razón por la que tampoco sirven para materia oscura, como bien sabemos de los capítulos 1 y 3.

De lo dicho anteriormente se deduce que los neutrinos son las únicas partículas dentro del Modelo Estándar que podrían jugar el papel de materia oscura, ya que son las únicas que interaccionan débilmente con el resto de la materia ordinaria y, además, son estables. De hecho, los neutrinos fueron propuestos en su momento como posibles responsables (totales o parciales) de la materia oscura, pero actualmente están descartados, ya que, al ser tan ligeros, la materia oscura sería del tipo "caliente" (recordemos: partículas muy rápidas) y no servirían para causar el agrupamiento de materia que observamos en la distribución de galaxias a gran escala.

Otra propuesta de materia oscura sin salirse del Modelo Estándar fueron los denominados *MACHOs* (Massive Compact Halo Objects), que son objetos parecidos a un planeta grande, como Júpiter, pero desligados de las estrellas. También pueden ser estrellas apagadas o "estrellas fallidas", en el sentido de que no llegaron a encenderse por no tener suficiente masa. Dichos objetos existen realmente y se han detectado gracias al efecto de lente gravitacional que producen, pero no son lo bastante abundantes para dar cuenta de la materia oscura. Y, además, no hubieran sido buenos can-

didatos para ella, ya que, como quedó claro en el capítulo anterior, la materia ordinaria no debe aportar más de un 4% (aproximadamente) a la densidad total del universo, frente al 23% que representa la materia oscura.

Es importante aclarar que hay una pieza clave del Modelo Estándar que aún no ha sido verificada. Según este modelo, todas las partículas elementales adquieren masa gracias a un mecanismo muy peculiar, llamado *mecanismo de Higgs*. La idea es que todo el universo (incluyendo los espacios vacíos) está lleno de un campo parecido al electromagnético: el *campo de Higgs*. Hay que imaginarse ese campo como una especie de líquido viscoso, invisible y omnipresente. De acuerdo con la teoría, sin este campo las partículas no tendrían masa: no costaría nada desplazarlas por el espacio. Pero, al estar presente, las partículas sienten una "fricción" con el "líquido" en el que están sumergidas (es decir, una interacción con el campo de Higgs) que dificulta su desplazamiento y hace el efecto de una masa.

Si el mecanismo de Higgs es correcto, el vacío no está realmente vacío y sería posible agitarlo. En la imagen anterior, equivaldría producir ondas en ese "líquido" omnipresente. Esas ondas se verían como partículas (inestables) de un nuevo tipo, llamadas *bosones de Higgs*. Pero aún no se ha detectado ningún bosón de Higgs. Precisamente, la producción y detección de estas partículas es uno de los objetivos principales del experimento de física de partículas más importante del mundo: el LHC (situado cerca de la ciudad sui-

za de Ginebra). El LHC es un gran acelerador de protones, que los lleva primero hasta velocidades extraordinariamente próximas a la de la luz y luego los hace chocar. En cada colisión se producen gran cantidad de partículas, la mayor parte conocidas. Pero también se espera poder producir y detectar bosones de Higgs. Como veremos, el LHC puede jugar también un papel importante para descubrir la identidad de la materia oscura.

La descripción que hemos hecho del campo de Higgs recuerda a la definición de energía oscura que dimos en la introducción: una energía que ocupa todo el universo, incluso los espacios vacíos. Sería tentador identificar la misteriosa energía oscura con el misterioso campo de Higgs. Efectivamente, hay una gran similitud entre ambos, pero el campo de Higgs (en su versión más simple, al menos) no puede jugar el papel de energía oscura. La razón, curiosamente, es que produce *demasiada* energía oscura. Pero esta discusión la tendremos en el capítulo siguiente.

Más allá del Modelo Estándar

El Modelo Estándar terminó de formularse hacia 1980 y desde entonces ha cosechado éxitos enormes en la descripción de las partículas elementales en multitud de aspectos diferentes. Todas las predicciones de la teoría que se han podido estudiar en un laboratorio han sido siempre confirmadas al máximo grado de precisión disponible (a veces extraordinario). La única excepción es el bosón de Higgs, que

esperamos sea producido y detectado en el LHC.

Sin embargo, hay motivos muy poderosos para pensar que el Modelo Estándar no supone “la última palabra” en cuanto a la descripción básica de la naturaleza. Para empezar, tenemos la propia materia oscura, que no tiene cabida dentro de él. Necesariamente, debe haber algo más que la tabla de partículas anterior. Y ese “algo” se sitúa, por definición, fuera del Modelo Estándar. Pero además hay otras razones, y es interesante conocerlas, ya que alguna de ellas puede estar también detrás de la existencia del “lado oscuro” del universo.

Anteriormente nos hemos encontrado con una interesante pregunta sin respuesta: ¿por qué las partículas están agrupadas en tres familias? Existen más preguntas de este tipo: ¿por qué las partículas de cada nueva familia tienen masas más grandes y qué determina el tamaño de esas masas?, ¿por qué hay precisamente cuatro interacciones básicas, unas más fuertes que otras?, etc. Estas preguntas se pueden resumir en una: ¿por qué el Modelo Estándar es como es? Y para responderla hay que ir necesariamente más allá del propio Modelo Estándar, en busca de una teoría más fundamental y satisfactoria. Por supuesto, ésta es una de las tareas más obsesivas y fascinantes para los físicos de partículas. Pero además de esta motivación *estética* general, hay razones muy concretas para esperar física más allá del Modelo Estándar.

Una razón es que el Modelo Estándar no incorpora a la

gravitación en pie de igualdad con las otras interacciones. Concretamente, no permite tratarla como una interacción de tipo cuántico. No tenemos espacio aquí para discutir en qué consiste la naturaleza cuántica de la materia, pero hay que decir que dicha naturaleza está muy bien establecida y que la gravitación se resiste a ser tratada de este modo. Por ello, se sospecha que a energías muy altas (mucho más, incluso, de las que puede producir el LHC), las partículas han de mostrar algún tipo de nueva física que permita la reconciliación teórica entre la gravitación y el resto de interacciones. El candidato más importante y estudiado para esa teoría más fundamental son las llamadas “teorías de cuerdas”, en las que no podemos entrar ahora, pero que volveremos a encontrarnos.

Otra razón para pensar en una nueva física es el llamado *problema de la jerarquía*. Podríamos preguntarnos: ¿por qué las masas de las partículas no son todas mucho más grandes (o más pequeñas)? Esta pregunta no es sólo filosófica. Se puede demostrar que las masas de las partículas en el Modelo Estándar “deberían” ser, de forma natural, un billón de veces más grandes. Las masas que realmente medimos se pueden acomodar en la teoría, pero a través de una solución muy inestable de las ecuaciones físicas. Es como si uno ve un lápiz sobre su punta, en equilibrio encima de una mesa. En principio es una situación posible, pero sabemos que hace falta mucha precisión para colocar un lápiz en esa posición tan inestable. Si vemos un lápiz así, sospecharemos que

hay “algo más” que no vemos, responsable de su estabilidad, como cuando vemos un truco de magia. Puede ser un anclaje debajo de la mesa, un hilo que lo sujeta o algo en lo que no hayamos pensado. Del mismo modo, la “pequeñez” de las masas de las partículas elementales nos hace suponer la existencia de nueva física más allá del Modelo Estándar. Y en este caso, además, se puede argumentar que esa física debería mostrarse a energías grandes, pero *accesibles* al LHC (cuando esté a su máxima potencia y rendimiento). Éste es, precisamente, el otro gran objetivo del LHC: descubrir la nueva física que resuelva el problema de la jerarquía.

Los físicos de partículas llevan más de 20 años trabajando en distintos aspectos de la “física más allá del Modelo Estándar”. Existen, por ejemplo, muchos modelos para intentar resolver el problema de la jerarquía. Y es típico que los físicos que conciben estos esquemas teóricos intenten también acomodar en ellos la materia oscura. Por ejemplo, lo habitual es que estos modelos predigan la existencia de nuevas partículas, y tal vez una de ellas podría ser la responsable de la materia oscura (no basta con decirlo: hay que calcular la producción de esa partícula en el universo primitivo y ver si concuerda con la abundancia real de la materia oscura). Éste es el motivo por el que hay tantos candidatos a materia oscura con nombres tan extravagantes. Todos ellos tienen que ver con distintos modelos de física más allá del Modelo Estándar. Pero, aunque no hay ningún modelo plenamente convincente, no todos están al mismo nivel. A

continuación comentamos dos de los más importantes.

Partículas supersimétricas

Un ingrediente esencial del Modelo Estándar son las simetrías, es decir, transformaciones matemáticas que dejan invariantes las ecuaciones de la teoría. El Modelo Estándar tiene numerosas simetrías, lo que permite explicar muchas de sus características, aunque no todas.

La *supersimetría* es un nuevo tipo de simetría que *no tiene* el Modelo Estándar, pero que es de un gran interés teórico. La supersimetría relaciona partículas con distinto *espín*. El espín de una partícula es su momento angular: intuitivamente, la forma en que gira sobre sí misma. Según la Mecánica Cuántica (sobre la que se basa el Modelo Estándar), el espín está cuantizado, es decir, no puede valer cualquier cosa, sino que es siempre un múltiplo de una cantidad mínima. En un cierto tipo de unidades, esa cantidad mínima es 1/2. Así, puede haber partículas con espín 0, 1/2, 1, 3/2, 2, etc. Las 12 partículas *de materia* verdaderamente elementales (electrón, muón, tau y sus familias respectivas) tienen todas espín 1/2, mientras que las partículas mediadoras tienen todas espín 1, excepto el gravitón, que tiene espín 2. La supersimetría es una transformación matemática que implica que por cada partícula de espín semientero ha de existir otra con las mismas características, pero de espín entero, y viceversa. Así, para cada una de las 12 partículas elementales (de espín 1/2) hay una partícula idéntica, pero con espín

0. Al electrón le corresponde el llamado *s*electrón. Y del mismo modo tenemos los *s*neutrinos, *s*quarks, etc. Algo análogo sucede para las partículas mediadoras de las interacciones. Así, tenemos los llamados fotino, gluinos, Z-ino, etc., todos ellos con espín 1/2. Además, tenemos el notorio bosón de Higgs (de espín 0) y su compañero supersimétrico, el Higgsino (espín 1/2). Esta proliferación de partículas recuerda a la predicción de las antipartículas, que realizó Dirac en 1930 (y verificada dos años más tarde). Las antipartículas tienen el mismo espín que las partículas a las que están asociadas, pero cargas opuestas. Las partículas supersimétricas tienen cargas idénticas, pero difieren en el espín.

La supersimetría fue concebida originalmente como una posibilidad teórica, una simetría posible de la naturaleza. Posteriormente, se vio que su existencia es prácticamente obligada en las teorías de cuerdas (las que son capaces de incorporar la gravitación). Pero además de esta belleza teórica, la supersimetría ofrece una solución muy satisfactoria al problema de la jerarquía y la ha convertido en el escenario más estudiado de física más allá del Modelo Estándar. Aunque no podemos entrar en detalles, hay que aclarar que esta solución exige que las masas de las partículas supersimétricas (squarks, gluinos, etc.) sean, como mucho, unos cientos o miles de veces la masa del protón. Por ello, si la supersimetría está realmente ahí, hay muchas posibilidades de verla (o sea, ver estas nuevas partículas) en el LHC. Pero, además, los físicos descubrieron que alguna de las partícu-

las supersimétricas, concretamente la más ligera de ellas, encaja perfectamente como responsable de la materia oscura. En la mayoría de las formulaciones, esa partícula es una combinación de fotino, Higgsino y Z-ino, y recibe el nombre de *neutralino*[9]. Un neutralino típico tiene una masa de unos cientos de veces la masa del protón e interacciona con la materia ordinaria a través sólo de la interacción débil. Además, es perfectamente estable. Estas características son ideales (aunque no las únicas posibles) para "hacer el papel" de materia oscura. De hecho, si la supersimetría es correcta, lo normal es que en el universo haya gran cantidad de materia oscura compuesta por neutralinos. Esto representa un gran éxito para la supersimetría, ya que ésta no fue concebida para acomodar un candidato a materia oscura.

Modos de Kaluza-Klein

Supongamos que en vez de vivir en un mundo con tres dimensiones espaciales, viviéramos en uno de una sola dimensión. Nuestro universo sería simplemente una línea y nosotros seríamos seres en forma de segmento que se desplazarían por ese alargado mundo. También podrían existir partículas, con o sin masa, moviéndose por nuestro universo-línea. Ahora supongamos que esa línea fuera realmente una superficie cilíndrica, pero de grosor microscópico, como un hilo de araña, pero aún más fino. A nosotros (seres alargados), este hecho nos pasaría inadvertido: no percibiríamos que nuestro universo era realmente de dos dimensio-

nes, ya que la *dimensión extra* (la pequeña circunferencia del cilindro) sería inapreciable a nuestros ojos. Sin embargo, esa dimensión extra sí produciría efectos físicos novedosos. Por ejemplo, para cada partícula aparecerían partículas nuevas con las mismas características, pero con mayor masa. Para entender esto imaginemos una partícula muy ligera, en reposo en ese mundo extraño. Supongamos ahora que la partícula da vueltas alrededor del cilindro, pero sin desplazarse por la dirección alargada. Para nosotros, que no veríamos la dimensión extra, la partícula seguiría parada en nuestro mundo aparentemente unidimensional. ¿En qué podríamos notar que realmente se mueve? La partícula tendría una energía (energía cinética) asociada a su movimiento. Esa energía la veríamos, sencillamente, como un incremento en la masa de la partícula (recordemos que por la Teoría de la Relatividad la masa no es más que energía concentrada). Por tanto, la partícula seguiría teniendo las mismas propiedades (por ejemplo, carga eléctrica o espín), pero mayor masa. Según la Mecánica Cuántica, la energía cinética a lo largo de esa dimensión extra estaría cuantizada: sólo podría ser múltiplo de una cierta cantidad. Así, pues, nos encontraríamos una serie de partículas nuevas, todas con características semejantes, pero cada una con mayor masa que la anterior. Estas nuevas partículas se denominan *modos de Kaluza-Klein*, en honor a los primeros físicos que conjeturaron la existencia de dimensiones extras. Según la Mecánica Cuántica, cuanto más pequeña sea la dimensión extra, más

grande resulta ser la masa de estos modos de Kaluza-Klein.

Algo semejante podría ocurrir en nuestro universo de "aparentemente" tres dimensiones espaciales. Podría haber una o más dimensiones extras, invisibles a nuestros ojos, pero con efectos físicos importantes, por ejemplo modos de Kaluza-Klein. La detección de estas nuevas partículas en el LHC pondría de manifiesto la existencia (y tamaño) de las dimensiones extras.

Las teorías de dimensiones extras han cautivado a muchos físicos y lo cierto es que las teorías de cuerdas (en la mayoría de sus formulaciones) las necesitan. Por ello, la presencia de dimensiones extras es muy habitual en modelos de física más allá del Modelo Estándar, aunque a menudo la estructura de las mismas no sea tan sencilla como en el ejemplo que hemos descrito. Por otro lado, en algunos de esos modelos, el problema de la jerarquía se puede resolver gracias a las dimensiones extras, y siempre hay muchas partículas nuevas (modos de Kaluza-Klein). Algunas de ellas son buenos candidatos para la materia oscura. El valor de su masa (unos cientos o miles de veces la masa del protón) y sus interacciones con la materia ordinaria (interacción de tipo débil) serían semejantes al caso de las partículas supersimétricas.

Si esta especulación (en alguna de sus formulaciones) es correcta, la materia oscura estaría hecha de partículas cuya masa proviene de su rápido movimiento en una dimensión extra, ofreciendo una excitante ventana a un mundo desco-

nocido.

La detección de la materia oscura

La materia oscura no es sólo algo lejano que se encuentra en la periferia de las galaxias. La materia oscura está también dentro de las galaxias, y lo más probable es que las partículas que la constituyen estén a nuestro alrededor. Esto nos da una oportunidad de detectarla sin movernos de la Tierra.

El análisis del movimiento de las estrellas en la Vía Láctea indica que, en nuestra región de la galaxia (a 24.000 años luz del centro galáctico), la densidad de materia oscura es equivalente a la masa de un protón por cada centímetro cúbico. Supongamos, para ser más concretos, que está hecha de neutralinos y que la masa de un neutralino es cien veces la del protón. Esto significa que tendríamos unos "diez neutralinos por litro" a nuestro alrededor. Pero esos neutralinos se moverían a gran velocidad (del orden de cien kilómetros por segundo) por efecto de la atracción gravitatoria del resto de la galaxia. Por ello, su flujo sería grande: cada centímetro cuadrado de su piel estaría siendo continuamente atravesado por unos cien mil neutralinos por segundo.

Este hecho recuerda la historia de los neutrinos. Su existencia fue propuesta, en 1930, por el gran físico W. Pauli para explicar la energía que aparentemente se perdía en algunas desintegraciones nucleares. Aunque algunos físicos ilustres, por ejemplo Eddington, no creyeron en su existencia,

los neutrinos fueron finalmente detectados en 1956. Realmente, el número de neutrinos a nuestro alrededor es gigantesco, pero sus interacciones con la materia ordinaria son sólo a través de la fuerza débil, muy pequeñas. Por ello, los experimentos para su detección se basan en utilizar grandes cantidades de algún material, esperando que algún neutrino entre billones interaccione con algún átomo del mismo. El caso de los neutralinos es muy similar, salvo que son mucho más pesados que los neutrinos y que su flujo es más pequeño. No obstante, los métodos experimentales también han progresado y existe la posibilidad real de detectarlos.

¿Cómo es un detector de materia oscura? Normalmente consiste en una cierta cantidad de material (por ejemplo, 100 kg en algunos experimentos), que simplemente se expone al bombardeo de las partículas de materia oscura. El material puede ser un cristal, como germanio, a muy baja temperatura, o un gas noble, como el argón. Existe un gran número de estos experimentos y hay más planeados para el futuro, lo que no es raro, tratándose de un campo tan apasionante. Para evitar que el material utilizado sea alcanzado por los abundantes rayos cósmicos que continuamente bombardean la Tierra, y que enmascararían el efecto de la materia oscura, el detector ha de alojarse en lugares subterráneos o en túneles dentro de montañas. De esta forma, las capas de roca absorben los indeseables rayos cósmicos…, aunque también producen radiactividad natural que puede

originar señales engañosas en el detector y que hay que "descontar" cuidadosamente. Cuando un neutralino (uno entre millones) choca con un núcleo atómico, produce un retroceso del mismo. Este efecto puede detectarse por diversas técnicas: un levísimo incremento de la temperatura del material (en el caso de detectores de cristal), un ligerísimo centelleo (en el caso de detectores de gas noble) u otros métodos. Aunque hablamos de neutralinos, los detectores no tienen prejuicios sobre la composición de la materia oscura y podría ser otro tipo de partícula la que atraparan. Hasta el momento, sin embargo, no se ha detectado ninguna partícula de materia oscura. Esto restringe sus posibles propiedades, concretamente el valor de su masa y la intensidad de su interacción con la materia. Así que, aunque aún no han tenido éxito, los experimentos para cazar materia oscura ya nos han dado información valiosa sobre ella.

Otra estrategia interesante es la detección *indirecta* de materia oscura. Hemos comentado en el capítulo anterior que una cantidad importante de ella podría haberse acumulado en el centro del Sol. Los neutralinos (o las partículas que sean) allí atrapados sufrirían choques entre ellos y muchos se aniquilarían entre sí, produciendo fotones, neutrinos y otras partículas ordinarias. Existen experimentos dedicados a la detección de esas partículas ordinarias emitidas, que nos darían información indirecta acerca de las partículas de materia oscura, cuya aniquilación las originó. Por ejemplo, hay gigantescos detectores de neutrinos que utili-

zan como material de detección grandes cantidades de agua del mar o de hielo del Polo Sur (sin producir ninguna alteración en ellos). Otros experimentos tratan de aprovechar las posibles aniquilaciones de la materia oscura en regiones exteriores de la Vía Láctea. Consisten en telescopios de rayos gamma (instalados en satélites o en tierra) o detectores de positrones o antiprotones (instalados en satélites). Estos experimentos están dando resultados muy interesantes, aunque su interpretación es delicada, ya que existen otras fuentes (de tipo astrofísico) que producen partículas del mismo tipo, lo que dificulta extraer la posible señal proveniente de la aniquilación de la materia oscura.

Finalmente, las partículas de materia oscura podrían producirse directamente en el LHC, como hemos comentado para los neutralinos y los modos de Kaluza-Klein. Su sola producción no probaría que son los constituyentes de la materia oscura, pero si las propiedades medidas (masa e interacción con la materia ordinaria) están en el rango adecuado para "interpretar" el papel de materia oscura, esto sería una indicación muy fuerte a su favor.

CAPÍTULO 5

El misterio inesperado: la energía oscura

En 1887, Michelson y Morley llevaron a cabo uno de los experimentos más famosos e importantes de la historia. En aquella época se creía que las ondas de la luz se propagaban en un extraño *éter*: una sustancia que debía llenar todo el espacio. El objetivo de Michelson y Morley era poner de manifiesto su existencia, midiendo la velocidad de la luz en diferentes direcciones. Dado que la Tierra gira alrededor del Sol, no puede estar siempre en reposo respecto al supuesto éter, igual que un barco que describe círculos en un estanque no puede estar siempre en reposo respecto al agua. Por ello, la velocidad aparente de las ondas luminosas dependería de la dirección por la que éstas se acercaran a la Tierra, igual que el barco de nuestro ejemplo vería acercarse más rápido las ondas de agua que avanzaran hacia su proa que las que lo hicieran hacia su popa.

La gran sorpresa fue que la velocidad resultó ser la misma en todas las direcciones. Esto resultó frustrante. De hecho, Morley no estaba convencido de sus propios resultados y repitió el experimento años después. Sin embargo, este experimento "fallido" estaba bien hecho y resultó ser crucial

para descartar el éter y establecer una nueva teoría del espacio y el tiempo: la Teoría de la Relatividad Especial (Einstein, 1905), una revolución científica de primer orden que transformó la manera en que miramos e interpretamos la naturaleza.

Existen algunos paralelismos interesantes entre esta historia y el descubrimiento de la energía oscura. En primer lugar, en los dos casos se han encontrado hechos inesperados: las teorías o los prejuicios en boga auspiciaban unos resultados experimentales muy distintos. Esto resulta refrescante y estimulante. Por más asentados que estén nuestros conceptos sobre la naturaleza, unos hechos experimentales claros y tozudos tienen mucha más fuerza, y los científicos han de aceptar humildemente el veredicto de la propia naturaleza. Hay que decir que las pruebas experimentales sobre la energía oscura no son todavía tan contundentes como las de la constancia de la velocidad de la luz. Se trata de un descubrimiento reciente en términos históricos, y aún necesita más apoyo experimental, pero las pruebas a su favor empiezan a ser muy firmes. Otro punto en común es que ambos hallazgos tienen que ver, de un modo u otro, con el éter. El experimento de Michelson-Morley fue crucial para descartar el éter. El descubrimiento de la energía oscura, curiosamente, recupera la idea del éter, si bien en una forma distinta a la que tenían en mente los físicos de finales del siglo XIX. Posiblemente, los dos hechos han producido una perplejidad parecida, cada uno en su época. Finalmente, como

ya se ha dicho, el experimento anunciaba una revolución científica y conceptual. Y nuestro deseo es que el descubrimiento de la energía oscura anuncie también cambios revolucionarios y excitantes en nuestra concepción del mundo.

El mensaje de las supernovas

Recordemos una vez más la famosa ecuación de Einstein, en la que se basa la cosmología moderna:

$$R^{mn} - \frac{1}{2} g^{mn} R = T^{mn}$$

El miembro de la derecha simboliza la materia y energía del universo; el de la izquierda nos dice cómo es y cómo evoluciona su geometría. Dijimos que, según esta ecuación, si la materia y energía del universo están distribuidas de forma homogénea, éste ha de pasar necesariamente por una fase de expansión (como realmente sucede). Podemos ahora ser más precisos: si el contenido del universo es materia (ordinaria u oscura) y radiación, la ecuación predice que la expansión se irá *ralentizando*. Esto parece muy lógico: la materia y la energía ejercen una atracción gravitatoria que frena la expansión, igual que, al lanzar una pelota hacia arriba, la gravedad terrestre frena su ascensión. En los años noventa dos equipos científicos independientes (el *High-z Supernova Search Team* y el *Supernova Cosmology Project*) se propusieron medir esa deceleración del universo. Para ello hay

que determinar la velocidad de alejamiento de las de las galaxias situadas a diferentes distancias (y, por tanto, en diferentes épocas). Pero, para hacerlo bien, hay que medir de forma independiente y fiable la velocidad de alejamiento de cada galaxia y la distancia a la que se encuentra.

La velocidad de alejamiento es bastante fácil de medir, ya que produce el famoso *desplazamiento al rojo* de los espectros luminosos. Cuando una fuente de ondas (luminosas o de otro tipo) se aleja de nosotros, la longitud de onda (distancia entre crestas) de las ondas que nos llegan se alarga. Éste es el familiar fenómeno de la sirena de una ambulancia que se acerca y luego se aleja. Primero la longitud de onda se acorta, con lo que el sonido se hace más agudo; después se alarga y el sonido se hace más grave. Del mismo modo, la longitud de onda de la luz emitida por objetos que se alejan se alarga, o, como se suele decir, se "desplaza hacia el color rojo", cuya longitud de onda es la más larga del visible. Fijándose en determinadas líneas espectrales (longitudes de onda características de absorción y emisión de luz por diversos tipos de átomos), se puede medir con gran precisión el desplazamiento al rojo, y de ahí deducir la velocidad de alejamiento de una galaxia o de cualquier objeto luminoso en el cielo.

Por otro lado, medir la distancia de un objeto muy lejano resulta más complicado, pero se puede hacer a partir de la luminosidad aparente que percibimos del objeto, *siempre que* conozcamos la luminosidad real del mismo. Es como si

mientras caminamos de noche por el campo vemos una luz en la distancia. Midiendo su intensidad, podríamos calcular la distancia a la que se encuentra, siempre que sepamos la luminosidad real de la lámpara que está originando dicha luz. Por ello, para los astrónomos es esencial conocer la luminosidad real de algunos objetos luminosos que sirvan como "lámparas estándar" (así es como se denominan en astronomía). Midiendo la luminosidad aparente de estos objetos en el cielo, tendremos una medida de la distancia a la que se encuentran. Los dos grupos científicos mencionados utilizaron como lámparas estándar *supernovas* de tipo Ia. Las supernovas son estrellas en explosión, y las de ese tipo son especialmente útiles porque producen siempre, con gran regularidad, el mismo brillo real (debido a que se originan a partir del mismo proceso físico, en el que ahora no podemos entrar). Además, son muy brillantes (tanto como la galaxia entera que las alberga), por lo que pueden usarse para medir distancias muy grandes.

En 1998, los dos equipos científicos presentaron sus impactantes conclusiones: el universo no está ralentizando su expansión, sino *acelerándola*. Dicha aceleración comenzó hace unos 5.000 millones de años. Este sorprendente resultado, obtenido de las supernovas, ha sido confirmado y reforzado después por otros equipos. Pero, entonces, o la ecuación de Einstein no es correcta, o en el universo hay algo más que materia y radiación; si no, la expansión debería ralentizarse.

Lo curioso es que añadiendo a la ecuación de Einstein una constante cosmológica, tal como él hizo y luego se arrepintió, la expansión puede efectivamente acelerarse. La nueva ecuación es:

$$R^{mn} - \frac{1}{2} g^{mn} R = T^{mn} + \Lambda g^{mn}$$

donde Λ es la llamada constante cosmológica[10]. Esta alteración de la ecuación es equivalente a seguir trabajando con la ecuación inicial *no modificada* y considerar Λ una energía constante asociada al propio vacío, que se añade a la ya contabilizada (T^{μ}) en el miembro de la derecha. Esta energía constante, de origen desconocido, es lo que se llama energía oscura. Pero podría suceder que realmente no fuera algo tan constante e inerte, sino que tuviera un carácter más dinámico. Por ello, resulta prematuro decir que la energía oscura es absolutamente equivalente a una constante cosmológica. Por el momento, lo que sabemos es que se parece mucho a ella, pero una definición más prudente sería decir que la energía oscura es "aquello" que está causando la expansión acelerada del universo.

¿Por qué una energía de vacío produce una expansión acelerada? La razón es que, según la ecuación de Einstein, una energía así produce *repulsión* gravitatoria. A muchos lectores esta idea les puede parecer antiintuitiva. Es como si al lanzar hacia arriba la pelota del ejemplo anterior, en vez

de frenarse, se acelerara. Sin embargo, la ecuación de Einstein indica que las fuerzas gravitatorias no dependen sólo de la masa (o energía) de la sustancia que las produce, sino también de su *presión*. La materia que flota inerte en el espacio no ejerce ninguna presión y la radiación ejerce una presión positiva. Por ello, provocan fuerzas gravitatorias atractivas. Pero la energía de vacío resulta ejercer una presión negativa[11] que, introducida en la ecuación de Einstein, provoca fuerzas gravitatorias repulsivas.

Los resultados de las supernovas permitieron hacer una estimación de la cantidad de energía oscura presente en el universo. Ha de ser del orden del 70% de la densidad crítica. Esto concuerda perfectamente con las indicaciones de la radiación de fondo (capítulo 3), por lo que ambos resultados se refuerzan mutuamente. ¿Es posible "sentir" de alguna forma directa esta densidad de energía o masa del espacio? Muy dificilmente; se trata realmente de una densidad diminuta. Por ejemplo, en el volumen total ocupado por la Tierra, la energía oscura aporta sólo 7 miligramos de masa, algo ridículamente pequeño. Sin embargo, la energía oscura está en todas partes, también en los espacios vacíos; y no olvidemos que la mayor parte del universo es espacio vacío, tal como discutimos en el capítulo 1, al construir nuestra maqueta de la Vía Láctea. Por ello, es a escala cósmica donde la energía oscura muestra su verdadera importancia. Y su detección natural es a través de observables cósmicos, como la expansión del universo. Merece la pena mencionar que el

valor de la constante cosmológica que imaginó Einstein y sus implicaciones físicas fueron muy diferentes a lo indicado por las supernovas. Pero también hay que reconocer que el concepto en sí de constante cosmológica es una invención de Einstein, una más en su impresionante lista de contribuciones científicas.

Como hemos dicho, la expansión acelerada del universo, y su natural interpretación en términos de una misteriosa energía del vacío, supuso una gran sorpresa. No es simplemente que los físicos no hubiesen considerado esta posibilidad, sino más bien que habían previsto justo lo contrario, o sea, que no hubiera ninguna energía del vacío. Para entender por qué se hizo esta previsión fallida, y valorar en toda su dimensión la sorpresa y el misterio de la energía oscura, hemos de tomar una perspectiva histórica sobre la cuestión.

Una vuelta de tuerca a un viejo problema

En el capítulo 4 discutimos el mecanismo de Higgs, responsable según el Modelo Estándar de la masa de las partículas. Recordemos que el hipotético campo de Higgs también llena todo el espacio y que, por ello, produce una contribución a la constante cosmológica, Λ. Esto se notó ya en 1980. El problema es que la contribución esperable del campo de Higgs es muchos órdenes de magnitud *mayor* de lo que ahora se ha medido. Además, las partículas elementales producen otras contribuciones enormes a Λ, relacionadas con diversos efectos cuánticos. En total, uno esperaría que

Λ fuera 120 órdenes de magnitud mayor de lo que se ha medido a partir de las supernovas, o sea, ¡un 1 seguido de 120 ceros veces mayor! Pero el hecho es que hasta 1998 no había siquiera indicios de que Λ fuera distinta de cero. La manera de razonar de (la mayoría de) los físicos antes de 1998 fue la siguiente: "Dado que el Modelo Estándar predice de forma natural una gran constante cosmológica, y que hasta ahora no hay ningún vestigio de la misma, lo más probable es que haya algún mecanismo desconocido que haga que ésta sea automáticamente cero. O quizá las leyes de la Relatividad General necesitan alguna modificación que haga que la energía de vacío no tenga ninguna consecuencia física, por lo que es normal que no detectemos ningún efecto observable asociado a la misma". En resumen, los físicos esperábamos que Λ fuera exactamente cero; de ahí la gran sorpresa producida por las mediciones de las supernovas.

Pero sigamos por un momento en los años anteriores a 1998. ¿Cuál podría ser ese mecanismo desconocido o esa modificación de las leyes físicas que "eliminaran" la indeseable constante cosmológica del mundo observable? Los físicos se estrujaron el cerebro ideando propuestas para quitarla de en medio, pero ninguna era satisfactoria. Esto es lo que se llamó el "problema de la constante cosmológica".

Pero si ya resultó difícil imaginar un mecanismo que hiciera que la constante cosmológica fuese cero de forma efectiva, todavía lo es mucho más imaginar uno que haga que sea extraordinariamente más pequeña que su "valor na-

tural”, *pero* distinta de cero. Y ésta es la nueva situación que han establecido las supernovas. Y aún hay más: la constante cosmológica, o mejor, digamos la energía oscura, no sólo es distinta de cero, sino que tiene un tamaño parecido a la densidad de materia del universo. Recordemos: la aportación conjunta de la materia oscura y ordinaria a la densidad del universo es el 27% del total. La energía oscura contribuye el restante 73% (cifras aproximadas). Ciertamente, supone más del doble que la aportación de la materia, pero podría haber sido mil o un millón de veces mayor o menor. ¿Por qué tiene precisamente un valor comparable a la densidad de materia? Esto es lo que se ha llamado el problema de la “coincidencia cósmica”. Esta intrigante coincidencia se da en el universo actual, pero *no* en épocas pasadas. La razón es que la densidad de materia va disminuyendo a medida que el universo se expande, ya que la misma cantidad de materia se va diluyendo en un espacio cada vez mayor. Pero la energía oscura está asociada al propio espacio, por lo que su densidad no disminuye. Hace 10.000 millones de años la densidad de energía oscura era la misma que ahora, pero la densidad de materia era mucho mayor. En aquella época no había coincidencia cósmica y, de hecho, el papel de la energía oscura era insignificante. Es precisamente *ahora* cuando se da la coincidencia.

Todo lo anterior son giros inesperados que ha tomado el viejo problema de la constante cosmológica, que ahora se llama “problema de la energía oscura”, y que resulta más in-

trigante aún que el viejo. Resumamos los problemas viejo y nuevo en unas preguntas.

Viejo problema de la constante cosmológica (situación antes de 1998)

¿Por qué, comparada con su valor "natural", la constante cosmológica es tan pequeña, probablemente cero?

Nuevo problema de la energía oscura (situación después de 1998)

¿Por qué, comparada con su valor "natural", la densidad de energía oscura es tan pequeña?

¿Por qué es distinta de cero (cuál es el origen de esa energía)?

¿Por qué tiene, precisamente ahora, un tamaño parecido a la densidad de materia?

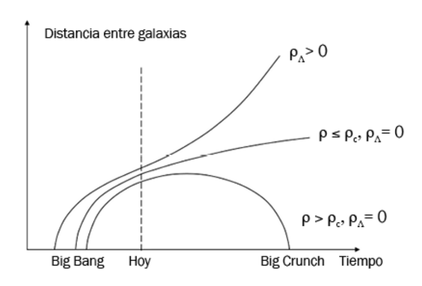
Evidentemente, la energía oscura se ha convertido en un reto fascinante para los físicos, y una de la áreas de investigación teórica y experimental más importantes del momento. Por cierto que, además de las supernovas, actualmente se está utilizando otro tipo de observaciones para extraer información sobre la energía oscura. Recordemos (capítulo 3) que la longitud de onda fundamental que apreciábamos en la radiación de fondo está también presente de forma prominente en la distribución de galaxias. Estudiando el tamaño aparente de esta longitud a diferentes distancias (y, por tanto, en diferentes tiempos) se puede obtener información valiosa sobre el ritmo de la expansión cósmica, y de ahí sobre la energía oscura, que ha influido en dicho ritmo de expansión.

La energía oscura y el destino del universo

Hemos razonado que la energía oscura tuvo un papel insignificante en épocas muy remotas. Pero, por la misma razón, va a tener un papel cada vez más determinante en el

futuro. De hecho, la energía oscura va a ser la que decida el destino final del universo.

Supongamos por un momento que no hubiera energía oscura. ¿Cuál sería, entonces, la evolución futura del universo? ¿Continuaría la expansión eternamente? Todo dependería, nuevamente, de la densidad de materia y energía, ρ. Si ésta fuera grande, mayor que la densidad crítica, ρc, la atracción gravitatoria terminaría por frenar la expansión. Las galaxias retrocederían sobre sí mismas y el universo experimentaría una fase de contracción, semejante a la actual de expansión, pero a la inversa. Y todo (también el espacio y el tiempo) acabaría en una Gran Implosión o Big Crunch, imagen invertida del Big Bang. Recordemos que cuando la densidad del universo es mayor que la crítica, el espacio es cerrado y finito. Pues bien, si no hubiera energía oscura, en un universo así el tiempo también sería finito: tendría un comienzo y un final. Por otro lado, si la densidad de materia y energía fuera menor (o igual) a la densidad crítica, la fuerza gravitatoria no sería suficiente para invertir la expansión: el universo seguiría expandiéndose eternamente, aunque de forma cada vez más lenta. El universo, que sería infinito espacialmente, sería también eterno. Repetimos que éste sería el futuro del universo si no hubiera energía oscura, exactamente lo que se creía antes de 1998. Todo esto está representado en las dos curvas inferiores del siguiente gráfico, donde hemos mostrado la separación entre galaxias en función del tiempo:



Ahora bien, sabemos que el universo contiene energía oscura. Actualmente, la densidad de energía oscura (que denotaremos $\rho\Lambda$) representa ya la mayor parte de la densidad del universo, un papel protagonista que lo será cada vez más en el futuro. Y la energía oscura produce repulsión gravitatoria, así que la expansión continuará eternamente (curva superior de la figura anterior), incluso si la densidad total del universo fuera mayor que la crítica. Realmente sabemos que es muy cercana a la crítica, pero no sabemos si es un poco mayor, un poco menor o tal vez exactamente igual. Pero, a efectos del destino del universo, es irrelevante. La energía oscura se encargará de que la expansión continúe y cada vez más deprisa.

¿Y cómo será ese destino del universo? Las pocas decenas de galaxias que forman el Grupo Local, pequeño cúmulo al que pertenece la Vía Lactea, continuarán ligadas por atracción gravitatoria. Es decir, nuestro Grupo Local permanecerá unido, pero el resto de miles de millones de galaxias actualmente visibles se alejarán de nosotros cada vez a mayor

velocidad (de forma exponencial). Cuando el universo tenga cien mil millones de años, la luz que nos llegará de esas galaxias será tan débil y estará tan desplazada hacia el rojo, que se volverán invisibles a todos los efectos. La propia radiación de fondo se habrá hecho tan tenue que será invisible. Sin embargo, todavía habrá estrellas durante cientos de miles de millones de años. Es decir, que podemos imaginar observadores inteligentes en esa época futura. A ellos les parecerá que el universo consiste en unas pocas galaxias que flotan en un océano de espacio totalmente vacío, exactamente como les parecía el universo a los astrónomos alrededor del año 1900. Además, no verán la radiación de fondo ni la expansión del universo (ya que no verán galaxias distantes alejándose). Por el mismo motivo no podrán detectar la propia energía oscura, principal responsable de la situación. En consecuencia, no podrán aprender del universo lo que hemos aprendido nosotros (a menos que les dejemos algún tipo de testimonio que pudiera llegar hasta ese futuro extraordinariamente lejano, algo difícil de concebir). No será una época muy buena para hacer cosmología, ésta es más divertida. Los otros cúmulos de galaxias que vemos en el cielo actual formarán también sus propios universos-isla, totalmente desgajados unos de otros. Más allá de aquella época, las estrellas terminarán de consumir su combustible (hidrógeno y otros elementos ligeros) y se apagarán. Literalmente, la desolación final será absoluta. ¿Hubiera preferido usted el apoteósico final del Big Crunch?

A lo largo de estos capítulos hemos considerado muchos observables cosmológicos: velocidades de estrellas y galaxias, abundancia de elementos ligeros, radiación de fondo, distribución de galaxias a gran escala, etc. Cuantos más observables consideremos, mayor número de test cruzados tendremos para comprender el universo y determinar sus magnitudes básicas. Hasta ahora, todos los test (todos los anteriores y algunos que no hemos mencionado) son consistentes con la distribución aproximada de ingredientes que hemos establecido desde un principio: 73% de energía oscura, 23% de materia oscura (fría) y 4% de materia ordinaria (de la que un 3,6% es gas intergaláctico, 0,4% estrellas y una parte aún más pequeña, neutrinos y radiación). Además, la densidad total de materia y energía se aproxima a la densidad crítica. Por cierto, este tipo de universo se suele denominar ΛCDM, para indicar que tiene una parte importante de energía oscura (Λ) y otra de materia oscura fría (*Cold Dark Matter*).

La evidencia sobre la energía oscura se sustenta, por tanto, no sólo por las indicaciones de las supernovas y la Radiación de Fondo, sino también por la consistencia con otros test que, de forma más indirecta, la involucran. Por su especial interés, vamos a mencionar uno de estos test adicionales: la edad del universo.

La edad del universo no es algo que se pueda medir de forma directa. Ahora bien, podemos poner cotas inferiores a

la misma, considerando objetos viejos del universo. La propia Tierra tiene cerca de 5.000 millones de años (como sabemos a partir de datos geológicos). Por tanto, el universo ha de tener al menos esa edad. Bastante más antiguas que la Tierra son las estrellas más viejas de los llamados cúmulos globulares (una especie de pequeñas galaxias esféricas en la periferia de la Vía Láctea). Los astrofísicos han determinado que su edad está entre los 12.000 y 15.000 millones de años (este amplio rango refleja las incertidumbres en la estimación). Así que tenemos objetos de al menos 12.000 millones de años, y posiblemente aún más viejos. ¿Por qué es esto tan importante? La edad del universo se puede calcular teóricamente a partir de la famosa ecuación de Einstein, que dicta su evolución. Supongamos que el universo no contuviera energía oscura. De la ecuación de Einstein se deduce que su edad actual sería bastante inferior a 12.000 millones de años, incompatible con la edad de las estrellas más viejas. De hecho éste era un resultado paradójico antes de 1998. Sin embargo, al tener en cuenta la energía oscura, el universo resulta ser más viejo de lo pensado. ¿Por qué? Lo que conocemos bien es el ritmo de expansión del universo ahora mismo. Echemos hacia atrás la película de la historia del universo, como ya hicimos en el capítulo 2. En esta película invertida vemos las galaxias acercándose unas a otras. Sabemos que, por efecto de la energía oscura, el universo ha estado acelerándose en los últimos 5.000 millones de años. Esta fase de expansión acelerada se ve en la película inverti-

da como una contracción *decelerada*: vemos que las galaxias se acercan las unas a las otras más despacio de lo que lo hubieran hecho sin energía oscura. En consecuencia, tardamos más tiempo en llegar al instante cero, cuando toda la materia se concentró en un punto. Este razonamiento puede seguirse observando el gráfico de la sección anterior, en el que representábamos la expansión del universo con y sin energía oscura. Del gráfico se deduce claramente que, cuando se incluye la energía oscura (curva superior), el momento del Big Bang debió de ocurrir más atrás en el tiempo. Concretamente, se deduce que la edad del universo es de unos 13.700 millones de años, perfectamente compatible con la edad de las estrellas más viejas conocidas.

Así que el universo ΛCDM parece ser efectivamente consistente con la edad del universo, y también con otros tipos de test que no hemos comentado. Hasta donde sabemos, todas las piezas encajan perfectamente en este rompecabezas cósmico, en el que hay que reproducir todas las observaciones disponibles a partir de las piezas que componen el universo. Y la energía oscura era la pieza que faltaba para que todo encaje correctamente.

Apenas hemos dicho nada sobre el posible origen de la energía oscura. No hay muchas ideas al respecto, aunque algunas son interesantes y merecen ser discutidas. Pero para entenderlas debemos hacer antes otro viaje por el espacio y el tiempo, objeto principal del próximo capítulo.

CAPÍTULO 6

Segundo viaje por el espacio y el tiempo

En los capítulos anteriores, salvo en nuestra discusión sobre los candidatos a materia oscura, hemos hablado sobre todo de hechos comprobados y teorías robustas, con gran apoyo experimental. Pero en los dos capítulos finales vamos a hablar, principalmente, de especulaciones. Eso no significa que sean "menos científicos". Como ya dijimos, la ciencia no es sólo hechos y escepticismo, sino también audacia e imaginación. La especulación forma parte de la empresa científica. Aunque, por supuesto, hasta que no reciba respaldo experimental, una especulación no pasará de ser una especulación.

Todo por nada

Empecemos por una pregunta frecuente y extraordinariamente difícil de responder: ¿de dónde salieron la materia y la energía que llenan el universo? Podemos hacer esta pregunta aún más filosófica: ¿por qué hay un universo en vez de no haber nada?

Para acercarnos a estas cuestiones, reflexionemos sobre lo siguiente. En el universo no sólo hay energía positiva,

sino también *energía negativa*. La positiva es la contenida tanto en la materia y radiación ordinaria como en la materia y energía oscuras, o sea, en todo lo que hemos visto hasta ahora. Entonces, ¿qué es la energía negativa?, ¿quizá algo todavía más extravagante que la energía oscura? Nada de eso, la energía negativa es simplemente energía contenida en el campo gravitatorio[12].

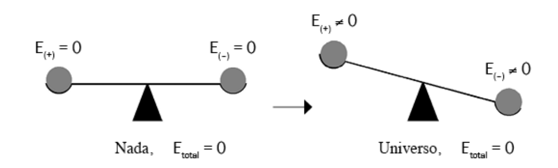
Esto no es realmente tan difícil de entender. Pensemos en la Tierra, que crea un campo gravitatorio en su exterior, responsable de que nos sintamos atraídos hacia su superficie o de que la Luna orbite a su alrededor. El valor de este campo depende exclusivamente de la masa de la Tierra. Imaginemos ahora que la Tierra tuviese la misma masa, pero que fuera hueca, como una gran pelota. El campo gravitatorio en su exterior seguiría siendo el mismo que cuando era maciza. Pero en el interior de la gran pelota las fuerzas gravitatorias actuando en distintas direcciones se compensarían perfectamente y reinaría la ingravidez: no habría campo gravitatorio en absoluto.

Supongamos ahora que esta pelota estuviera hecha de un material deformable, parecido a la gelatina. Entonces la propia Tierra sentiría la fuerza de atracción generada por ella misma y "caería" hacia el centro. La inmensa pelota gelatinosa se haría cada vez más gruesa y pequeña, a medida que su colapso se acelerara. Paremos esta película en mitad del colapso. Las zonas que al inicio eran interiores, pero que estaban inmediatamente debajo de la superficie terrestre, aho-

ra se habrían convertido en zonas exteriores a la empequeñecida Tierra. En esas zonas inicialmente no había campo gravitatorio y ahora sí lo habría. Para en el resto de regiones todo seguiría igual: las que ya eran exteriores seguirían siéndolo y sintiendo el mismo campo gravitatorio, y la región interior de la encogida pelota seguiría teniendo campo gravitatorio nulo. Por tanto, el efecto neto del colapso habría sido crear campo gravitatorio en algunas regiones donde antes no lo había. Pero, simultáneamente, esa extraña y gelatinosa superficie terrestre habría adquirido una gran velocidad de caída y, por tanto, energía cinética. ¿De dónde ha salido esa energía? Simplemente del campo gravitatorio recién creado y que almacena una energía negativa.

Volviendo a nuestra Tierra real, ésta posee una gran cantidad de energía positiva: la equivalente a su masa, según la famosa ecuación $E = mc^2$. Pero también tiene una energía negativa: la almacenada en su propio campo gravitatorio. En el caso de la Tierra, la energía positiva es muy superior a la negativa, pero, a escala cósmica, ambas son muy parecidas. Podría ser incluso que fueran exactamente iguales. En otras palabras, ¡puede que nuestro universo no contenga ninguna energía neta! Este hecho resulta enormemente sugerente. Se ha especulado que el universo podría haberse generado por una fluctuación de tipo cuántico a partir literalmente de la *nada*. Éstas no dejan de ser palabras sugestivas, más que una descripción científica precisa. Aunque es notable que fascine a muchos, la nada es probable-

mente un concepto mal definido, ya que por lógica no puede corresponder a ningún estado: un estado es algo que existe, y la nada, por definición, no puede existir. Tratar de imaginar la nada puede ser como tratar de imaginar un triángulo de cuatro lados. No obstante, hagamos un esfuerzo de imaginación. No cabe duda de que en la nada (signifique ésta lo que signifique) no puede haber ninguna energía, ni positiva, ni negativa. Por ello, la hemos representado pictóricamente como la balanza de la izquierda en la siguiente ilustración.



Los dos pesos de la balanza representan los dos tipos de energía. El nivel al que se encuentran en el dibujo simboliza el nivel cero de energía. Así que ambas están puestas a cero, por lo que la energía total es también cero. Pero en un instante dado (que sería el primer instante, ya que en la nada tampoco habría tiempo), la balanza podría inclinarse: se habría generado energía positiva a expensas de la producción de una energía negativa equivalente. La energía total seguiría siendo cero, respetándose así el principio de conservación de la energía. Esto está representado en la balanza de la derecha, que simboliza un universo con energía positiva

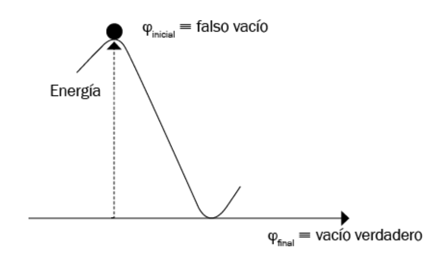
y campo gravitatorio, como el nuestro. Desde ese punto de vista, la energía positiva (y concretamente la materia de la que estamos hechos) provendría de un "préstamo" hecho al comienzo del universo por la energía gravitatoria negativa. Si el universo estuviera destinado a terminar en un Big Crunch, ése sería el momento en que devolveríamos el préstamo y regresaríamos a la nada. Como todo indica que el universo seguirá expandiéndose eternamente, el préstamo no será devuelto nunca.

Inflación

El llamado *universo inflacionario* es un modelo teórico que ha recibido mucha atención en las últimas décadas y que permite realizar algunas de las ideas que acabamos de exponer. El modelo se basa en una hipótesis sobre lo que pudo haber ocurrido cuando el universo tenía menos de una billonésima de billonésima de segundo. Aquí estamos adentrándonos en un periodo en el que no estamos seguros de las leyes físicas que gobiernan a las partículas (véase el capítulo 2). Por tanto, estamos especulando, pero sigamos con la especulación. La hipótesis es que, en ese instante remoto, un campo (parecido al campo de Higgs)[13] se hallaba fuera de su mínimo de potencial. En otras palabras, el valor del campo *no* era el que hacía que su energía fuera mínima. Esto pudo haber sido consecuencia de la primera fluctuación que originó el universo, tras la cual los campos podrían tener valores aleatorios. Pero, independientemente de la razón

que condujera a esta situación, si esto sucedió así en aquel instante en algún lugar del universo (y *ésa* es la hipótesis), las consecuencias fueron espectaculares, como vamos a ver.

El siguiente dibujo ilustra una situación como la que acabamos de describir. Hemos designado el campo por la letra griega ϕ. La altura de la curva representa la energía del campo dependiendo de su valor. La bolita simboliza el valor del campo en un momento dado. Supongamos que inicialmente el valor del campo (la bolita) está en lo alto de la pendiente. Evidentemente, el campo almacenaría una cierta cantidad de energía (energía positiva). Una situación así se suele denominar *falso vacío*. ¿Qué sucedería?



En algún momento, la bolita "caerá" a su mínimo (el campo tomará el valor que minimiza su energía). Pero hasta ese momento, esa región del espacio tendrá una energía de vacío almacenada en el campo. Y sabemos la implicación de una energía así. Es exactamente como la energía oscura que hemos discutido en el capítulo anterior: provocará una expansión acelerada del universo (o de esa región del univer-

so). Si la densidad de energía almacenada en el campo es mucho mayor que la energía oscura actual (y, tal como dijimos, ésa es precisamente la situación natural), entonces la expansión será vertiginosa, mucho más rápida que la velocidad de la luz. Este proceso se denomina *inflación*, en analogía con la inflación económica, y de ahí el nombre de "universo inflacionario".

El caso registrado de inflación económica más exagerado hasta la fecha ocurrió en Hungría en 1946, cuando en un solo mes el precio de las cosas se multiplicó por 400 billones. Pues bien, en el universo inflacionario, ¡el volumen del universo se multiplicó por muchos billones de billones en una pequeñísima fracción de segundo! Pero como el espacio estaba lleno de ese campo (ϕ), la energía almacenada en él aumentó también de esa forma colosal, a costa de la creación de una energía negativa equivalente contenida en el campo gravitatorio. Ésta fue, según el modelo, la época del gran préstamo proporcionado por la energía gravitatoria. Cuando finalmente el valor del campo cayó a su mínimo, es decir, al *vacío verdadero*, toda la energía acumulada en él se transformó en la materia y energía que hoy llena el universo.

El universo inflacionario es algo más que una pura especulación, puesto que ha cosechado grandes éxitos. Por ejemplo, el modelo predice que la densidad de energía del universo así creado ha de ser (casi exactamente) la densidad crítica, que es precisamente lo que se observa. Así que el universo inflacionario responde a la pregunta: ¿por qué dia-

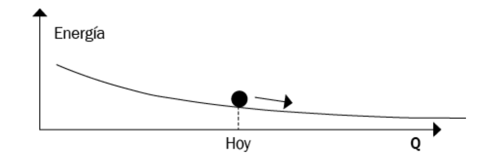
blos la densidad del universo ha de aproximarse tanto a la crítica? Además, esta predicción del modelo es muy anterior a las observaciones que la han corroborado, lo que es muy notable. Por otro lado, el universo inflacionario predice fluctuaciones de densidad en el universo muy primitivo, y esas fluctuaciones se corresponden perfectamente con las observadas en la radiación de fondo. Para ser más precisos, cuando en el capítulo 3 discutimos las diversas ondas acústicas en el plasma primitivo, hicimos la asunción implícita de que inicialmente todas las ondas (de cualquier longitud de onda) tenían la misma presencia; si bien en el momento de la Recombinación unas se notaban más que otras. Esa situación inicial con (casi) el mismo contenido en todas las ondas es la que predice el modelo inflacionario y concuerda perfectamente con los datos. Nuevamente esta predicción es anterior a la observación (en este caso, la de las fluctuaciones en la radiación de fondo). Además, el universo inflacionario resuelve también ciertos aspectos antinaturales del modelo cosmológico sin inflación, en los que ahora no podemos entrar.

Por todo ello, el universo inflacionario goza de una gran reputación y es objeto de estudio por parte de los físicos. Sin embargo, el modelo implica un escenario tan extremo que la mayoría de los físicos considera que aún necesitamos pruebas más claras para darlo por confirmado experimentalmente. Además, no tenemos un candidato natural para el campo ϕ (o, lo que es casi lo mismo, hay decenas de ellos en

diferentes modelos de nueva física).

Quintaesencia

Como acabamos de ver, en el modelo inflacionario, el universo atraviesa una fase inicial de expansión acelerada, causada por la acumulación de energía en un campo que llena el espacio. Todo funciona como una constante cosmológica pura, pero no lo es. En el caso inflacionario la energía de vacío está asociada al valor de un campo, que va evolucionando más o menos rápido. De forma muy semejante se ha propuesto que la energía oscura podría provenir de un campo (parecido al campo ϕ) que evolucione lentamente. Esto queda ilustrado en el siguiente esquema:



El campo Q, responsable de la energía de vacío, es denominado *quintaesencia* (por supuesto, nada que ver con la quintaesencia de los griegos clásicos). La bolita indica el valor del campo hoy en día. De la figura se deduce que ese valor seguirá cambiando, haciendo que la energía acumulada en el vacío sea cada vez menor (pudiendo llegar a ser cero en algún momento). La hipótesis de la quintaesencia demuestra que la energía oscura no tiene por qué ser exactamente equivalente a una constante cosmológica perpetua e

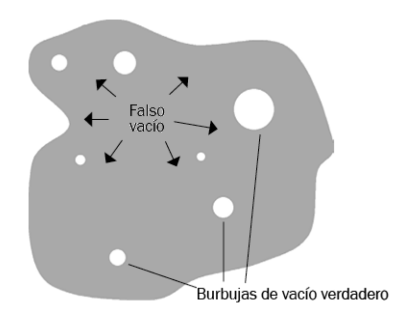
inmutable. Podría ser dinámica y cambiar con el tiempo. Usando la terminología introducida anteriormente, podríamos estar ahora mismo en una situación de falso vacío. En un modelo así, el universo podría perder paulatinamente toda la energía oscura que actualmente tiene y evadir el destino que hemos descrito en el capítulo anterior, aunque el nuevo no sería mucho más seductor.

Hoy por hoy, es justo decir que la hipótesis de la quintaesencia no resuelve ninguno de los problemas asociados a la energía oscura y, en realidad, añade alguno nuevo. Desde luego la quintaesencia no explica por qué todas las contribuciones a la constante cosmológica son cero, excepto la pequeña contribución del campo Q. Tampoco explica el valor peculiar y antinatural de la energía oscura en el universo actual (a pesar de ingeniosos intentos para ello). Como problema añadido, el perfil de energía del campo Q (figura anterior) es muy extravagante: concretamente, ha de tener una pendiente pequeñísima, para que la evolución de Q sea pequeña a lo largo de miles de millones de años, lo que es muy difícil de ajustar en un modelo teórico sensato.

Inflación eterna

Dejemos a un lado la quintaesencia y situémonos mentalmente en la remota época de la inflación. El universo se encontraba en un falso vacío, razón por la cual se expandía vertiginosamente. Entonces, en ciertos puntos, al azar, el campo responsable de la energía de vacío cayó a su valor de

mínimo, es decir, al vacío verdadero. En estos puntos se formaron “burbujas” de vacío verdadero que empezaron a crecer, situación representada en el siguiente dibujo:



Cada burbuja corresponde a un Big Bang “ordinario”, que da lugar a un universo independiente. Se podría pensar que, como las burbujas crecen, al final contactan entre ellas y todo el universo acaba fusionándose en un único vacío verdadero. Sin embargo, en muchos modelos inflacionarios esto no es así. Aunque las burbujas de vacío verdadero crecen, el falso vacío que hay entre ellas se expande como una goma a un ritmo mucho mayor. Por ello, no llegan a contactar jamás. De hecho, cada vez están más alejadas, si bien en el espacio intermedio continúan generándose nuevas burbujas (puntos donde el campo cae a su valor de mínimo). En este escenario, la expansión del falso vacío, y con ella la creación incesante de nuevos universos, continúa eternamente. Esto nos da una imagen radicalmente copernicana del mundo, en la que no sólo somos una insignificancia dentro de nuestro

universo, sino que todo nuestro universo no es más que una pequeña burbuja que se enciende y se apaga dentro de un escenario infinitamente más colosal. Esta noción jugará un papel importante en el próximo capítulo.

La idea de una expansión vertiginosa separando universos puede parecer excesivamente especulativa para ser tomada en serio. Pero no olvidemos que, en realidad, eso *es* lo que le sucede a nuestro universo. La energía oscura está produciendo una expansión acelerada del mismo, literalmente una inflación, sólo que a un ritmo mucho menor que la inflación primitiva examinada en este capítulo. Y sabemos que nuestro destino será el alejamiento de los cúmulos de galaxias, unos de otros, hasta hacerse inobservables. Los universos-isla resultantes no serán muy distintos de la situación que acabamos de describir en la inflación eterna. Y a los habitantes de esos futuros universos-isla quizá les parecerá también fantasioso el relato de lo que realmente habrá sucedido.

CAPÍTULO 7

Multiverso

En el capítulo 5 dijimos que *casi* nadie fue capaz de prever que la densidad de la energía oscura[14], ρΛ, fuera distinta de cero. Pero hay una notable excepción. En 1987, 11 años antes del descubrimiento de la energía oscura, el eminente físico Steven Weinberg (premio Nobel en 1979 por sus aportaciones a la formulación del Modelo Estándar) previó esta posibilidad. Es más: dedujo un rango de valores probables para ρΛ, que incluye el valor finalmente medido. ¿En qué se basó Weinberg para realizar esta sorprendente predicción?

El principio antrópico y la energía oscura

Supongamos que el universo observable ("nuestro universo") es sólo un miembro más de un gran conjunto de "universos", del mismo modo que nuestro sistema solar es un miembro de un inmenso conjunto de sistemas solares. La diferencia es que desde la Tierra podemos observar otros sistemas solares. Y desde nuestro universo, por definición, no podemos observar otros universos. Han de estar fuera de nuestra capacidad de observación directa. Al final del capítulo anterior vimos una forma en la que podría darse esta

situación: a través del proceso de inflación eterna y la producción continua de burbujas de vacío verdadero (cada una, un “universo” independiente). En las próximas secciones profundizaremos más en ese mecanismo y consideraremos otros alternativos. Pero, por el momento, supongamos tan sólo que, gracias a la inflación eterna o por la causa que sea, nuestro universo observable es sólo un miembro de un inmenso conjunto.

Supongamos, además, que la energía del vacío, ρΛ, puede tomar un valor diferente en cada universo. Esto no es tan raro. Pensemos nuevamente en la inflación eterna. El campo o campos responsables de la inflación podrían presentar más de un valor que minimiza su energía, del mismo modo que un campo de golf tiene diversos hoyos. Esto está representado esquemáticamente en el siguiente dibujo:



Cada uno de esos mínimos energéticos (valles de la curva) corresponde a una situación estable, un vacío de la teoría. Al igual que los hoyos de un campo de golf, esos mínimos no tienen por qué estar a la misma profundidad, por lo que cada uno puede tener una energía de vacío diferente. Así, pues, los abundantes universos generados por la infla-

ción eterna podrían tener energías de vacío diversas.

Resumiendo lo anterior, la hipótesis que estamos haciendo, y que hizo Steven Weinberg en 1987, es que "nuestro universo observable es un miembro de un inmenso conjunto de 'universos', que pueden tener energías de vacío distintas". Esto se puede deber a la inflación eterna o a otros mecanismos, de momento no entramos en ello. Ahora sólo vamos a examinar las consecuencias de esta hipótesis.

En la siguiente ilustración hemos representado simbólicamente algunos de los universos del gran conjunto, cada uno con su densidad de energía oscura: ρΛ1, ρΛ2, ρΛ3, etc.



Uno de estos universos es el nuestro (*ésa* es la hipótesis). Ahora viene el punto crucial: nuestro universo ha de ser necesariamente uno que reúna las condiciones necesarias para la generación de vida. Esto es prácticamente una tautología (o, si se quiere, una perogrullada): sólo podemos pertenecer a (y, por tanto, observar) un universo que haya sido capaz de generar vida inteligente. Es lo mismo que sucede con los sistemas solares: sólo podemos estar en uno que posea algún planeta con condiciones aptas para el desarrollo de la vida. Este principio autoevidente es lo que se llama *principio antrópico*. La cuestión ahora es: ¿para qué valores de la

energía de vacío, $\rho\Lambda$, *puede* aparecer vida en el universo?

Como se ha discutido en capítulos anteriores, la energía de vacío produce una expansión acelerada del universo. Si $\rho\Lambda$ es demasiado grande, en el universo primitivo las partículas de materia se alejan rápidamente unas de otras y no llegan a formar jamás galaxias ni estrellas. Por supuesto tampoco habría planetas ni evolución biológica. La necesidad de que se formen estas estructuras implica que, *en un universo con vida*, $\rho\Lambda$ podría ser, como mucho, unas cien veces la densidad de materia (ordinaria y oscura) del universo, que designaremos ρM. Un universo con una $\rho\Lambda$ mayor es perfectamente posible, *pero* no contendría seres vivos que lo pudieran observar. Por otro lado, aunque no lo hemos dicho hasta ahora, la densidad de energía del vacío podría ser *negativa* (como la energía del campo gravitatorio). Pero la ecuación de Einstein predice que un valor muy negativo de $\rho\Lambda$ haría que el universo colapsara rápidamente (lo contrario de una expansión acelerada). Y necesitamos al menos el tiempo suficiente para que se produzcan estrellas y planetas. Por ello, el valor absoluto de esa $\rho\Lambda$ negativa no puede ser grande, como mucho, unas diez veces la densidad de materia ρM.

Así que ya conocemos el rango aproximado de valores de $\rho\Lambda$ aptos para la aparición de vida: entre -10 y 100 veces el valor de ρM. Y ésta fue la predicción de Steven Weinberg. Recordemos que las observaciones indican que en el universo hay un 27% de materia (entre oscura y ordinaria) y un

73% de energía oscura, por lo que el valor real de ρΛ es 2,7 ρM, que lógicamente está dentro del rango anterior, puesto que en nuestro universo hay seres vivos.

¿Significa el razonamiento anterior que el valor "natural" de ρΛ es entre -10 y 100 veces el de ρM? No exactamente. Es probable que el valor natural de ρΛ sea muchos órdenes de magnitud mayor que ρM, tal como dijimos que sugieren los cálculos teóricos. En ese caso, la inmensa mayoría de universos del gran conjunto anterior tendrían energías de vacío gigantes. Pero por ello mismo no serían aptos para la vida y tampoco contendrían observadores. Sólo los pocos (en términos relativos) universos con energía de vacío "pequeña" pueden contener observadores, y nosotros hemos de pertenecer a uno de ellos. ¿Y por qué tendría que haber algunos universos con energía de vacío pequeña? Hemos mencionado en éste y otros capítulos que existen muchas contribuciones a la energía del vacío: el campo de Higgs, efectos cuánticos asociados a las partículas elementales, la propia energía del mínimo en el que haya elegido caer el campo inflacionario, etc. De hecho, puede haber aún muchas más contribuciones, como luego veremos. La suma de todas ellas es lo que determina la energía de vacío total. Y aunque todas las contribuciones sean muy grandes, existe la posibilidad de que por puro azar se cancelen unas con otras produciendo un valor pequeño de ρΛ, en el rango adecuado para la vida. Eso sucederá en muy pocos universos, en términos relativos. Pero con que suceda en algunos es suficien-

te para que existan observadores en ellos.

Demos un paso más en el argumento. Supongamos que en un sorteo de lotería el número premiado se extrae al azar entre el número 0 y el 100.000, como se hace en la lotería de Navidad. Todos los números son igualmente probables, pero lo normal es que el número premiado no sea muy bajo[15], digamos inferior a 1.000. La sencilla razón es que hay muchos más números entre 1.000 y 100.000 que entre 0 y 1.000. Ahora pensemos: nosotros hemos de pertenecer a uno de los privilegiados universos con vida y, por tanto, con ρΛ en el rango adecuado para la vida (aproximadamente, entre cero y cien veces ρM). En principio, podemos estar con igual probabilidad en cualquiera de ellos. Pero, al igual que con los números de la lotería, es de esperar muchos más universos con energía de vacío en la parte "grande" del rango (digamos entre una y cien veces ρM) que en la pequeña (inferior a ρM). Por ello, lo más probable es que la energía de nuestro vacío sea mayor que ρM. Éste fue el razonamiento de Weinberg y su exitosa predicción.

¿Qué hay de malo con el principio antrópico?

En general, el principio antrópico que hemos utilizado en la sección anterior no goza de muy buena reputación entre los físicos, si bien en los últimos años esta percepción ha cambiado. El propio Weinberg afirma que no le gusta la explicación antrópica de la energía oscura. ¿A qué se debe esta reticencia?

En primer lugar, como ya se ha dicho, el principio antrópico es en esencia tautológico: "Los seres vivos sólo pueden vivir donde hay condiciones para la vida". Y una tautología por sí misma no explica nada. Ahora bien, el principio antrópico *unido* a la hipótesis de un gran conjunto de universos sí puede explicar cosas, e incluso se pueden hacer predicciones basadas en él (como ilustra perfectamente el caso de Weinberg y la energía oscura). Pero, efectivamente, si nuestro universo fuera único, el principio antrópico no explicaría nada. Concretamente, seguiríamos sin entender la pequeñez de la energía de vacío comparada con su valor "natural". Una analogía de esto nos la da nuestro planeta. La Tierra reúne unas condiciones adecuadas y nada triviales para el surgimiento y desarrollo de la vida: órbita estable a una distancia conveniente del Sol, tamaño adecuado, presencia de ingredientes apropiados para la vida —como el agua—, etc. Si nuestro sistema solar fuese único en el universo, no entenderíamos por qué un planeta presenta un equilibrio tan delicado de condiciones. Pero como en el universo hay billones de sistemas solares, no es de extrañar que algunos (o muchos) planetas reúnan por puro accidente las condiciones requeridas.

Es interesante notar que el principio de la selección natural de Darwin tiene también un aroma tautológico: "Los más preparados para sobrevivir sobreviven más". Pero cuando, genialmente, Darwin combinó este principio con la hipótesis sobre la transmisión hereditaria de caracteres y las

mutaciones al azar, la idea adquirió una potencia inusitada para entender la evolución y diversificación de los seres vivos. Naturalmente, en el caso de la constante cosmológica está aún por ver que la hipótesis del gran conjunto de universos sea cierta.

De todas formas, hay que admitir que una explicación basada en el principio antrópico no es completa. Si la energía oscura de nuestro universo es como es por puro accidente, tenemos que renunciar a explicarla a partir de principios básicos. Esto puede resultar frustrante y además nos deja sin saber qué causas físicas hay detrás de la energía oscura: ignoramos cuáles son esas contribuciones que de manera azarosa se cancelan unas con otras. Ésta es quizá la principal razón por la que muchos físicos fruncen el ceño cuando se invoca el principio antrópico. Hay una postura detrás del tipo: "No nos rindamos antes de tiempo. Intentemos explicar la energía oscura (o lo que sea), basándonos en primeros principios. Y si no funciona, ya consideraremos el principio antrópico". Como actitud psicológica puede ser conveniente, pero no hay que olvidar que los científicos buscan ante todo la verdad. Y la verdad *podría* ser que la energía oscura es la que es por mero accidente, guste o no guste. Y, de momento, hay que reconocer que el principio antrópico se ha apuntado un tanto importante al ofrecer una explicación a las tres cuestiones que asociábamos al problema de la energía oscura: ¿por qué es tan pequeña?, ¿por qué es diferente de cero?, ¿por qué su tamaño es del mismo orden que la

densidad de materia? Hasta el momento, ninguna explicación alternativa lo ha conseguido (aunque esto podría significar, simplemente, que los físicos no son lo bastante inteligentes).

Finalmente, se ha acusado al principio antrópico de tener un aire místico, nada científico. Esto es un prejuicio injusto, basado seguramente en un mal entendimiento del principio. Si éste dijera: "Los parámetros físicos del universo están ajustados en la forma que lo están *con la finalidad* de que sea posible la vida", entonces esta crítica sería justa. El principio estaría sugiriendo que algo o *alguien* (¿Dios?) ajustó los parámetros físicos iniciales —diseñó el universo— para que nosotros hayamos podido surgir. Pero el principio antrópico no dice nada acerca de finalidades. Solamente señala el hecho aplastante de que "los parámetros físicos de *nuestro* universo tienen que ser necesariamente aptos para el surgimiento de la vida". Como ya se ha dicho, es al combinar este principio con la hipótesis de un gran conjunto de universos, cuando el principio puede explicar cosas. Realmente, las explicaciones antrópicas no tienen nada de místico, sino todo lo contrario: ofrecen una justificación plausible a posibles confabulaciones aparentemente misteriosas (entre valores de parámetros físicos) que hacen posible la vida. El principio podría explicar cómo estas confabulaciones tienen lugar por mero accidente, sin intervención sobrenatural. Nuevamente, vemos la analogía con la idea de Darwin, que permitió explicar la extraordinaria complejidad

de los seres vivos a partir de una cadena de accidentes (unida al proceso de selección), sin intervención sobrenatural.

No obstante, hay que reconocer que el principio antrópico (incluso por el propio nombre que se le ha dado) puede ser fácilmente objeto de malas interpretaciones, atribuyéndole una trascendencia que no tiene. Y una vez más observamos el paralelismo con la idea de la evolución de Darwin, que puede ser (y ha sido) malinterpretada de una forma cercana al misticismo. Concretamente se ha dicho que "los seres vivos van mutando sus características *con la finalidad* de mejorar su capacidad de supervivencia". Pero no es así: las mutaciones ocurren *al azar*, aunque sólo sobreviven las más aptas para la supervivencia.

Misterios cósmicos

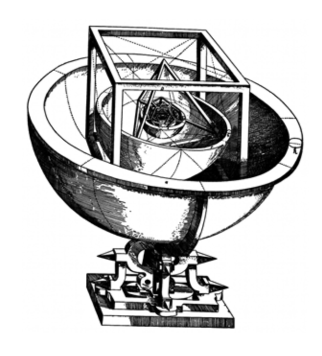
Hemos dicho que, a veces, la realidad física viene determinada por el principio antrópico, guste o no guste. Comentemos algunos ejemplos.

El Sol es una estrella de segunda generación, es decir, formada a partir de material que ya ha sido procesado por otras estrellas (las cuales pudieron acabar explotando y expulsando ese material al exterior). Este hecho está obligado por el principio antrópico, ya que de esta manera los planetas que se formaron a la vez que el Sol (y a partir del mismo material) pueden contener carbono, que es esencial para la vida. Los planetas de una estrella de primera generación estarán compuestos, sobre todo, de hidrógeno y helio.

La edad del universo *en este momento* no podría ser mucho más grande de la que es (las estrellas ya se habrían apagado y con ellas la vida) ni mucho más pequeña (las estrellas no habrían nacido o no habrían producido aún el carbono necesario). De esto se dio cuenta Robert Dicke en 1961, pero científicos ilustres, como Dirac, habían intentado previamente explicar la edad actual del universo a partir de modelos teóricos.

El valor del radio de la órbita terrestre ha de ser el que es, dentro de un rango bastante estrecho. De otra forma, el agua no estaría en forma líquida en su superficie y sería muy difícil el desarrollo de la vida (como testifican los otros planetas). Merece la pena referir aquí el caso histórico del gran físico Johanes Kepler (1571-1630). Kepler demostró que las órbitas de los planetas no eran circulares, sino elípticas, y enunció las leyes correctas del movimiento planetario (leyes de Kepler). Sin embargo, antes de estos enormes logros cometió un error. En su época se conocían, además de la Tierra, cinco planetas: Mercurio, Venus, Marte, Júpiter y Saturno. Kepler buscó alguna razón que justificara la existencia de *precisamente* cinco planetas y el tamaño de las órbitas correspondientes. Y creyó hallar la respuesta conectando estas cuestiones con los cinco sólidos regulares que existen: tetraedro, cubo, octaedro, dodecaedro e icosaedro. Se sabía desde el tiempo de los griegos que éstos son los únicos poliedros regulares. Kepler creyó que las esferas celestiales que transportaban los cinco planetas estaban sus-

tentadas por estos poliedros perfectos (en tamaño gigantesco), anidados uno dentro de otro, lo cual daba además una explicación al tamaño de sus órbitas. Kepler llegó a pensar que había tenido una especie de revelación, publicando sus conclusiones en el libro *El misterio cósmico*, al que pertenece el siguiente dibujo:



Posteriormente, tratando desesperadamente de ajustar su especulación a los datos astronómicos, Kepler comprobó que era imposible y acabó reconociendo su error. La realidad es que no hay ningún principio fundamental detrás del radio de la órbita terrestre, sólo el anodino principio antrópico.

Por cierto, a Kepler hay que reconocerle su genialidad, incluso cuando se equivocó. Investigar razones teóricas para los hechos básicos del universo es lo que hace la física: no contentarse con que las cosas están ahí, sino buscarles una explicación. Recordemos que en aquella época el sistema solar parecía único y, por tanto, un hecho básico del

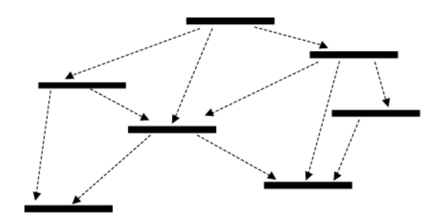
universo. Y la idea de buscar su explicación en simetrías matemáticas subyacentes es asombrosamente moderna. En este sentido, Kepler caminaba muy por delante de su tiempo.

Inflación eterna y el multiverso

En los dos epígrafes finales vamos a explorar dos sugerencias sobre cómo pudo haber surgido el gran conjunto de universos requerido para que el principio antrópico pueda jugar un papel relevante.

Anteriormente, hemos hablado de la inflación eterna, mencionando que los campos inflacionarios podrían presentar muchos mínimos energéticos, con energías de vacío diferentes, como los hoyos de un campo de golf. Esto es "una posibilidad", pero resulta que ésta se realiza en el ámbito de la teoría de cuerdas. Recordemos que esta teoría es el único candidato serio hasta la fecha para unificar la gravitación con el resto de interacciones. La teoría se basa en la asunción de que las partículas elementales no son puntuales, sino pequeños filamentos ("cuerdas"). Esta hipótesis sencilla conduce a una teoría extraordinariamente complicada desde el punto de vista matemático, y con implicaciones sorprendentemente potentes. De ser cierta, la teoría de cuerdas predice una gran unificación de todas las interacciones y todas las partículas. Por ejemplo, un electrón, un quark y un fotón serían simplemente cuerdas idénticas en estados de vibración distintos. Por otro lado, aunque la teoría es esencial-

mente única, existen muchas soluciones a sus ecuaciones, con contribuciones muy diversas a la energía del vacío. Esto genera muchos escenarios físicos, llamados “vacíos de la teoría”. Los numerosísimos vacíos de la teoría de cuerdas (de los que sólo una mínima parte han sido explorados teóricamente) tienen propiedades físicas distintas. No sólo distintas energías de vacío, sino también distintas interacciones, distintos tipos de partículas e, incluso, distinto número de dimensiones espaciales. De forma esquemática, hemos representado en la siguiente imagen algunos de estos vacíos. Cada raya horizontal corresponde a un vacío distinto y su altura representa la energía de vacío asociada.



El universo podría encontrarse, inicialmente, en uno de esos vacíos, por ejemplo el correspondiente a la raya superior. Si su energía de vacío es muy grande, se producirá un fenómeno de inflación y el universo se expandirá de forma colosal. Según la Mecánica Cuántica, aunque ese vacío parezca estable, existe una probabilidad no nula de que, en un punto dado del espacio, el estado “salte de ese vacío a otro”. El nuevo vacío podría ser cualquiera de los energéticamente

accesibles. En la figura anterior, las flechas discontinuas que parten del vacío superior representan algunas de esas posibles transiciones. Por consiguiente, en el espacio inflacionario se formarán burbujas correspondientes a distintos vacíos de la teoría de cuerdas, con propiedades físicas diferentes y, concretamente, con distintas energías de vacío. En algunas de estas burbujas dicha energía de vacío seguirá siendo grande, por lo que el proceso de inflación proseguirá dentro de ellas. Pero el vacío de su interior podrá saltar, a su vez, a otros nuevos vacíos (algunas de estas nuevas transiciones están ilustradas por el resto de flechas de la imagen anterior). Así que, dentro de esas burbujas, se formarán nuevas burbujas correspondientes a nuevos vacíos. Al final, es prácticamente inevitable que el universo pase por todos los vacíos, bien en distintas regiones del espacio (totalmente desgajadas unas de otras), bien en distintas épocas del tiempo.

Un escenario así se ha venido a denominar en los últimos años *multiverso*, en contraste con un único *uni*-verso. El multiverso que emana de la teoría de cuerdas es una "arena" perfecta para que el principio antrópico pueda jugar su papel, ya que existe una cantidad verdaderamente extraordinaria de vacíos de cuerdas, y muchos de ellos se diferencian tan sólo en el valor de su energía de vacío.

La noción de multiverso profundiza todavía más en la imagen copernicana del mundo. No es sólo que nuestro universo pueda ser uno más entre muchos, sino que las par-

tículas elementales, interacciones, etc., que nos son familiares, podrían ser un accidente de nuestro universo, y ser distintas en otros. Aclaremos, sin embargo, que (al menos en este contexto) otras leyes físicas más básicas —por ejemplo las leyes de la Mecánica Cuántica— serían compartidas por todos ellos.

Se ha propuesto que el multiverso podría ser también eficaz para entender el valor de otros misteriosos parámetros de las partículas elementales: el número de familias de partículas, sus masas y otros en los que ahora no podemos entrar. El multiverso podría explicar, incluso, el problema de la jerarquía, discutido en el capítulo 4. Pero, aunque divertidos, estos juegos son arriesgados. Uno tiene que razonar cuál es el rango de valores del parámetro estudiado que conduce a condiciones aptas para el desarrollo de la vida, tal como hizo Weinberg con la energía de vacío. En este último caso, su argumento parece convincente, pero para otros parámetros las cosas están mucho menos claras. Hay que imaginar un mundo con partículas diferentes, diferentes masas, diferentes interacciones, etc. Es como hacer "física-ficción". Y resulta peligroso hacer afirmaciones rotundas sobre la imposibilidad de que se genere vida en un mundo con propiedades distintas, sobre el que no tenemos ninguna experiencia directa.

El jardín de senderos que se bifurcan

¿Es posible imaginar una situación aún más copernicana

que la del multiverso? (y que tenga también una base científica). En efecto, se puede ir aún más allá.

Según la Mecánica Cuántica, el estado de una partícula está representado por la llamada *función de onda*, que se suele nombrar por la letra griega ψ. Toda la información acerca de la partícula (posición, velocidad, energía y demás propiedades) está contenida en ψ. Pero ψ puede ser una combinación o *superposición* de otras funciones de onda ψ1, ψ2, ψ3, …

$$\psi = \psi1 + \psi2 + \psi3 + \ldots$$

ψ1, ψ2, ψ3, … corresponden a diferentes estados de la partícula. Por ejemplo, cada una de ellas puede representar a la partícula con una energía distinta (E1, E2, E3, …). Por tanto, si la partícula se encuentra en el estado ψ, *no tiene* una energía definida. Al medir su energía se puede obtener cualquiera de las que están representadas en la superposición: E1, E2, E3, … con igual probabilidad[16]. Según la interpretación ortodoxa de la Mecánica Cuántica, después del proceso de medida (o, en general, de cualquier proceso de observación) la función de onda cambia. Si, por ejemplo, hemos encontrado que la partícula tiene una energía E1, la función de onda salta automáticamente de ψ a ψ1, un fenómeno llamado colapso de la función de onda. Pero si no realizamos ninguna medida y dejamos que la partícula evolu-

cione, seguirá en el estado superposición, ψ. En ese caso, su evolución temporal está determinada por la famosa ecuación de Schrödinger (en la que ahora no podemos entrar). Lo importante es que ψ no perderá su carácter de superposición. Cada uno de los términos $\psi 1$, $\psi 2$, $\psi 3$, ... evolucionará de forma independiente, y el estado de la partícula seguirá siendo una superposición de todos ellos. Esta situación seguirá en el tiempo mientras no efectuemos una medida, que provocaría el colapso de la función de onda. Lo que hemos dicho para la energía se puede aplicar, en esencia, a cualquier propiedad de la partícula: posición, velocidad, dirección de su espín, etc. Además, se puede aplicar no sólo a partículas individuales, sino a cualquier sistema físico: átomos, objetos..., incluso al universo como un todo.

La anterior descripción puede resultar extravagante para quien no esté familiarizado con la Mecánica Cuántica, pero está respaldada por innumerables hechos experimentales en los ámbitos más diversos. La Mecánica Cuántica es una teoría de precisión y éxito sin parangón en la historia de la ciencia. Sin embargo, los físicos siempre han estado incómodos con las dos formas de evolucionar de la función de onda: obedeciendo a la ecuación de Schrödinger cuando no se efectúan medidas u observaciones y colapsando cuando se efectúan. En principio, el proceso de medir no debería obedecer leyes distintas a las de cualquier otro proceso físico. Además, para el universo como un todo, no disponemos de un observador que "desde fuera" pueda efectuar una me-

dida y hacer que colapse la función de onda.

En 1957, Hugh Everett propuso una perspectiva diferente: el colapso de la función de onda nunca se produce. Cada término de la superposición anterior $\psi1$, $\psi2$, $\psi3$, ... sigue existiendo después de la medida. Entonces, ¿cómo es posible que el observador vea sólo un resultado de la medida y no todos a la vez? La razón es que la función de onda global del sistema formado por el observador y el objeto observado es también una superposición de estados, y en cada uno de ellos el observador "ve" un resultado diferente de la medida. Esto es lo que pasa si se elimina el mecanismo del colapso. Y la hipótesis de Everett es que esto es lo que realmente sucede. De alguna forma, el "yo" del observador se desdobla en muchas ramas cuánticas (distintos términos de una superposición como la de arriba). Cada "yo" observa cosas distintas. En una rama cuántica, el observador ve la partícula en una posición; en otra, la ve en una distinta. Naturalmente, las historias posteriores en cada una de las ramas serán también diferentes, pero todas ocurren en el mismo sitio y de forma simultánea. Ésta es la llamada interpretación de los muchos mundos de la Mecánica Cuántica. Puede parecer delirante, pero la Mecánica Cuántica resulta bastante delirante se interprete como se interprete (lo cual la hace apasionante). Y en cierto sentido es una interpretación más económica que la ortodoxa, ya que elimina el axioma del colapso de la función de onda, si bien tampoco está exenta de incomodidades teóricas, que ahora no podemos discutir.

Con el tiempo, la interpretación de Everett ha ido ganando adeptos y hoy en día se considera una perspectiva perfectamente seria de la Mecánica Cuántica, aunque, desde luego, no está comprobada (y es difícil diseñar experimentos que puedan decidir entre ella y la ortodoxa).

Volvamos al principio antrópico: necesitábamos un gran conjunto de universos con propiedades distintas (en particular, con energía oscura distinta) para que el principio pueda seleccionar aquéllos donde surja la vida. Una forma ya vista de conseguirlo es a través del multiverso. En él, cada universo es una región separada espacial o temporalmente de las otras. La interpretación de los muchos mundos ofrece una alternativa: la función de onda del universo total puede ser una superposición de muchas o todas las posibilidades de universo (por ejemplo, todos los vacíos asociados a la teoría de cuerdas). Eso significa que todas las posibilidades se realizan a la vez, pero en distintas ramas cuánticas. Y sólo en aquellas ramas donde surgen observadores la energía de vacío podrá ser medida, con el resultado anunciado por el principio antrópico.

Así que, si se acepta la hipótesis de los muchos mundos, no es sólo que nuestro universo pueda ser uno más entre muchos, es que el propio "yo" que sentimos sería sólo una de nuestras versiones: el "yo" de una cierta rama cuántica. Y de forma permanente se siguen creando bifurcaciones del mismo, puesto que continuamente estamos realizando observaciones de uno u otro tipo. Los nuevos "yoes" que se

crean a cada momento comparten los recuerdos del pasado, pero tienen ante sí un futuro diferente. Esencialmente, todas las posibilidades potenciales se realizan en una u otra rama de nuestra complicada función de onda. Por ejemplo, si apostamos a un número en la ruleta de un casino, la mayor parte de los "yoes" que se crean en ese momento verán fallar la apuesta, pero en algunas afortunadas ramas algunos de nuestros "yoes" resultarán agraciados.

Esta perspectiva relativiza nuestra propia existencia, ya que en otras ramas cuánticas ésta transcurre por distintos derroteros. El valor de nuestras propias decisiones queda relativizado, dado que en otras ramas las decisiones tomadas pueden haber sido otras. Se trata de un panorama caótico, aunque tal vez pueda ofrecer algún consuelo. Por ejemplo, los seres queridos que hemos perdido podrían continuar viviendo en otras ramas y nosotros disfrutando de su compañía. Aunque no podemos saltar de una rama a otra, puede reconfortar el hecho de que "en otros mundos" las cosas son distintas y quizá mejores. Es fascinante pensar sobre las diversas implicaciones de esta interpretación de la Mecánica Cuántica, pero no hay que olvidar que, de momento, se trata sólo de una interesante especulación.

En 1941, 16 años antes de la propuesta de Everett, el gran escritor argentino Jorge Luis Borges anticipó la interpretación de los muchos mundos de una forma literaria en su delicioso relato "El jardín de senderos que se bifurcan". Escribe Borges: "El tiempo se bifurca perpetuamente hacia innu-

merables futuros”. Y un poco antes: “Esa trama de tiempos que se aproximan, se bifurcan, se cortan o que secularmente se ignoran, abarca todas las posibilidades. No existimos en la mayoría de esos tiempos; en algunos existe usted y no yo; en otros, yo, no usted; en otros, los dos. En éste, que un favorable azar me depara, usted ha llegado a mi casa”.

Bibliografía

Cosmología tradicional y moderna

DODELSON, S. (2003): *Modern Cosmology*, Academic Press [especializado].

GUTH, A. H. (1999): *El universo inflaccionario*, Debate.

HU, W. y *WHITE*, M. (2004): "La sinfonía cósmica", *Revista Investigación y Ciencia*, 331, abril.

SAGAN, C.: *Cosmos*, Planeta.

WEINBERG, S.: *Los tres primeros minutos del universo*, Alianza Editorial.

Páginas web

Página de divulgación de Ned Wright sobre cosmología, en: *http://www.astro.ucla.edu/~wright/cosmolog.htm*

Bases teóricas: Relatividad General, Mecánica Cuántica y Modelo Estándar

CASAS, A. (2009): *El LHC y la frontera de la física*, Los Libros de la Catarata/CSIC.

FEYNMAN, R.: *Física II* [capítulo de introducción a la relatividad general], Addison-Wesley.

PENROSE, R. (1991): *La nueva mente del emperador* [parte de introducción a la Mecánica Cuántica], Mondadori.

WEINBERG, S. (1993): *El sueño de una Teoría Final*, Crítica.

Páginas web

Página interactiva sobre la física de partículas, en: *http://particleadventure.org/spanish/index.html*

Materia y energía oscuras

FRIEMAN, J.; TURNER, *M. y* HUTERER, *D.* (2008): "Dark Energy and the Accelerating Universe", *Ann.Rev.Astron.Astrophys*, 46, 385-432 [especializado, accesible en Internet].

ROOS, *M.* (2010): *Dark Matter: The evidence from astronomy, astrophysics and cosmology*, arXiv:1001.0316 [astro-ph.CO] [especializado, accesible en Internet].

Páginas web

Páginas de Wikipedia, en: *http://es.wikipedia.org/wiki/Materia_oscura*; *http://es.wikipedia.org/wiki/Energia_oscura*

Notas

[1] Es justo mencionar que este hecho, así como la concepción heliocéntrica del sistema solar, habían sido genialmente intuidos por Aristarco en el siglo III a.C.

[2] En realidad, deberíamos usar tres canicas, ya que Alfa-Centauri es un sistema de tres estrellas.

[3] Concretamente, haría falta que la masa invisible dentro de un radio r fuera aumentando proporcionalmente a r. Así, se compensaría exactamente el denominador en la ecuación de arriba, con lo que se obtendría siempre la misma velocidad v para cualquier distancia r.

[4] Hay que aclarar que, en los sistemas galácticos, la teoría de Newton es una excelente aproximación de la de Einstein, y sus predicciones son prácticamente idénticas. Por tanto, una modificación de la teoría de Newton a esas escalas supone necesariamente una modificación de la teoría de Einstein subyacente.

[5] En el caso del litio, la predicción está algo por encima de las observaciones, lo que podría deberse a una infravaloración de las incertidumbres (teóricas y observacionales) involucradas. Actualmente, es un tema de investigación activo.

[6] Aclaremos, de paso, que para un objeto muy lejano su distancia actual de nosotros es bastante mayor que el resultado de multiplicar la velocidad de la luz por el tiempo que nos ha tardado en llegar. La razón es que el espacio intermedio se ha estirado mientras tanto, debido a la expansión cósmica.

[7] La materia ordinaria contiene también otras partículas, especialmente los electrones de los átomos (por cada protón hay un electrón). Pero los electrones son mucho más ligeros que los protones y neutrones. Por ello, abusando un poco del lenguaje, se puede (y se suele) identificar la materia ordinaria con la materia bariónica.

[8] Como la onda había tenido tiempo de realizar media oscilación en 380.000 años, su periodo era el doble de este intervalo. Por otro lado, su longitud de onda se puede deducir a partir de su periodo (conocido) y la velocidad del sonido (también conocida en un plasma como el primitivo).

[9] El hecho de que una partícula física sea una mezcla de las “originales” es un hecho sorprendente, pero habitual en el marco de la Mecánica Cuántica, donde los estados físicos pueden ser combinación cuántica de otros estados (volveremos sobre ello en el capítulo 7). Este hecho, sin embargo, es irrelevante para la idoneidad del neutralino como materia oscura.

[10] Un apunte técnico: dependiendo de las convenciones y unidades usadas, los términos de la ecuación de Einstein pueden aparecer en otros textos con signos y factores numéricos distintos.

[11] La presión positiva es la habitual de un gas. Si tenemos gas en un globo, nos costará trabajo comprimirlo. Por tanto, ese gas, ocupando ahora un volumen menor, almacenará mayor energía. Por el contrario, para un globo “lleno de energía oscura”, reducir su volumen conlleva reducir la energía almacenada (ya que en este caso la energía está asociada al espacio). Por ello, su presión es negativa.

[12] Los que hayan estudiado la energía potencial asociada a la ley de Newton, tal vez recuerden que, efectivamente, tiene signo negativo.

[13] Técnicamente, el campo ha de ser lo que se llama un campo escalar, como lo es también el campo de Higgs (el responsable de la masa de las partículas). Un campo así simplemente tiene un valor en ca-

da punto del espacio. Por el contrario, los familiares campos eléctricos y magnéticos tienen también dirección, apuntan hacia algún lado.

[14] En este capítulo hablaremos indistintamente de energía oscura o energía del vacío, que designaremos como ρ_Λ. Por otro lado, la constante cosmológica, Λ, es también equivalente a energía del vacío. La relación exacta entre ellas es $\rho_\Lambda = c^2 \Lambda / (8\pi G)$, donde c es la velocidad de la luz y G la constante de Newton.

[15] Por este motivo, mucha gente prefiere no comprar números muy pequeños en la lotería, pero, naturalmente, cada número individual tiene la misma probabilidad, sea grande o pequeño.

[16] La probabilidad es igual porque en la superposición elegida todos los términos ψ_1, ψ_2, ψ_3, ... entran con idéntico peso.

Imágenes

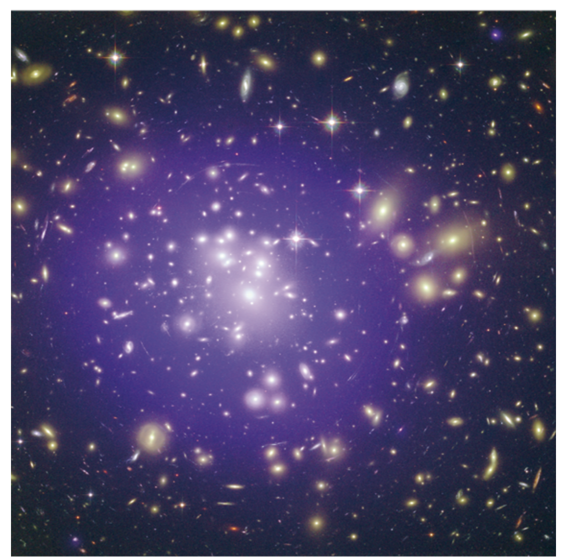
Figura 1
Galaxia NGC 3953, similar a nuestra Vía Láctea.



Fuente: Tom and Gail Haynes/Adam Block/NOAO/AURA/NSF.

Figura 2

Cúmulo de galaxias Abell 1689. La nube violeta es la imagen en rayos X de la nube de gas intergaláctica (representada en falso color).



Fuente: X-ray: NASA/CXC/MIT/E.-H Peng *et al.*; Optical: NASA/STScI.

Figura 3

Cúmulo de galaxias 0024+1654. Los arcos azules son imágenes múltiples y distorsionadas de una galaxia mucho más lejana.



Fuente: http://www.spacetelescope.org/images/opo9610a/; crédito: W.N. Colley and E. Turner (Princeton University), J.A. Tyson (Bell Labs, Lucent Technologies) and NASA/ESA

Figura 4

Cúmulo de la Bala. Se trata en realidad de dos cúmulos de galaxias en proceso de choque. Las nubes de gas caliente de los dos cúmulos (representadas en color rosa), se alejan del centro, después de haberse atravesado una a otra.



Fuente: X-ray: NASA/CXC/CfA/M.Markevitch *et al.*; Optical: NASA/STScI; Magellan/U.Arizona/D.Clowe *et al.*

Figura 5

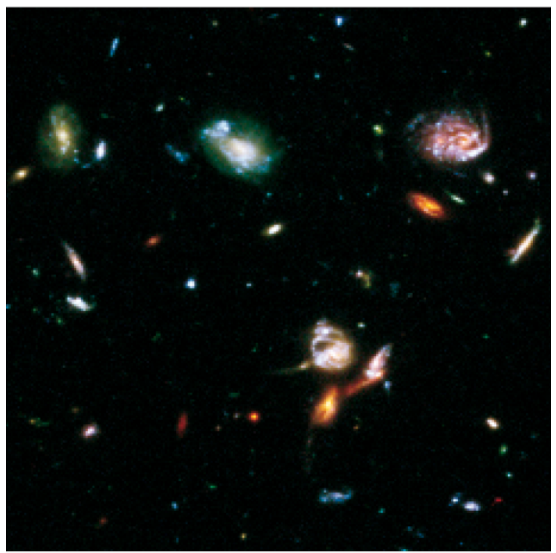
Cúmulo de la Bala, como en la figura 4. Las nubes azules representan la materia oscura de este sistema.



Fuente: X-ray: NASA/CXC/CfA/M.Markevitch *et al.*; Optical: NASA/STScI; Magellan/U.Arizona/D.Clowe *et al.*; Lensing Map: NASA/STScI; ESO WFI; Magellan/U.Arizona/D.Clowe *et al.*

Figura 6

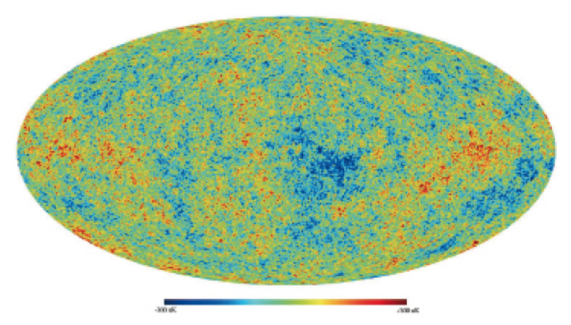
Fragmento del 'campo ultraprofundo del *Hubble*'. Se trata de la imagen más lejana del universo obtenida en luz visible.



Fuente: NASA, ESA, S. Beckwith (STScI) and the HUDF Team.

Figura 7

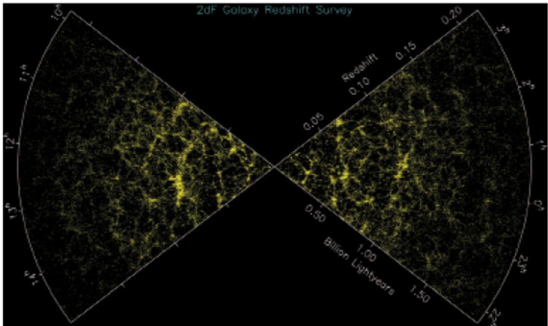
Mapa del cielo representando la temperatura de la radiación de fondo (rojo=caliente, azul=frío).



Fuente: NASA/WMAP Science Team.

Figura 8

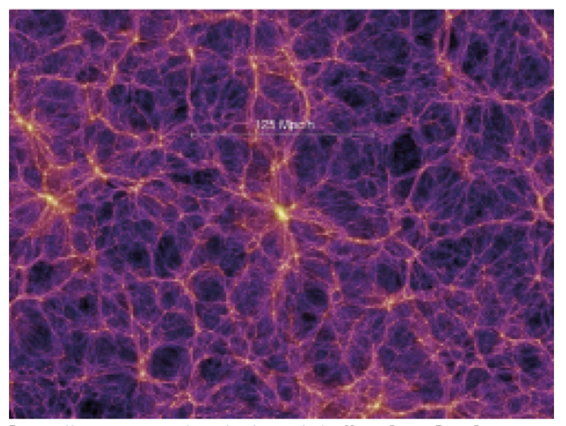
Distribución de galaxias en un sector del universo. Cada punto luminoso corresponde a una galaxia (hay más de 200.000 representadas).



Fuente: http://www2.aao.gov.au/~TDFgg/ (Image Gallery); crédito: The 2dF Galaxy Redshift Survey.

Figura 9

Simulación de la distribución de materia oscura en un fragmento del universo. Las galaxias se agruparían en las zonas más densas, representadas como más brillantes.



Fuente: http://www.mpa-garching.mpg.de/galform/virgo/millennium/; crédito: Millenium Simulation Project, Springel *et al.* (2005).

ÍNDICE